เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of
54th KASETSART UNIVERSITY ANNUAL CONFERENCE

สาขาวิทยาศาสตร์ Science
สาขาพันธุวิศวกรรม Genetic Engineering
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
Architecture and Engineering
สาขาอุตสาหกรรมเกษตร Agro-Industry
สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
Natural Resources and Environment

กลุ่มที่ 2



นวัตกรรมด้านการเกษตรเพื่อห่วงโซ่มูลค่าระดับโลก

Agricultural Innovation for Global Value Chain

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceedings of 54th Kasetsart University Annual Conference

เล่มที่ 2

สาขาวิทยาศาสตร์ (Subject: Science)

สาขาพันธุวิศวกรรม (Subject: Genetic Engineering)

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

(Subject: Architecture and Engineering)

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Subject: Agro-Industry)

และ สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources and Environment)

จัดโดย (Organized by)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)

ร่วมกับ (in cooperation with)

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (Office of the Higher Education Commission)

กระทรวงศึกษาธิการ (Ministry of Education)

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives)

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Ministry of Science and Technology)

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Ministry of Natural Resource and Environment)

กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

(Ministry of Information and Communication Technology)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (National Research Council of Thailand)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (The Thailand Research Fund)

2 - 5 กุมภาพันธ์ 2559 (February 2 - 5, 2016)

ISBN : 978-616-278-304-3

คำนำ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ได้จัดให้มีการประชุมทางวิชาการครั้งที่ 54 ระหว่างวันที่ 2 – 5 กุมภาพันธ์ 2559 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างและพัฒนาคุณภาพของงานวิจัย และเผยแพร่ความรู้ความก้าวหน้าทางด้านวิชาการและเทคโนโลยี ตลอดจนเป็นการแลกเปลี่ยนความรู้และระดมความคิดเห็นระหว่างนักวิชาการ อันจะนำไปสู่แนวทางการสร้างผลงานวิจัยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศชาติต่อไป

เอกสารฉบับนี้รวบรวมเรื่องเต็มผลงานวิจัยภาษาไทยและภาษาอังกฤษทั้งภาคบรรยายและภาคโปสเตอร์ของ **สาขาวิทยาศาสตร์ จำนวน 27 เรื่อง สาขาพันธุวิศวกรรม จำนวน 3 เรื่อง สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ จำนวน 53 เรื่อง สาขาอุตสาหกรรมเกษตร จำนวน 40 เรื่อง และสาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จำนวน 19 เรื่อง** ซึ่งได้ผ่านการคัดเลือกจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิประจำสาขาและนำเสนอในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54

ในนามของคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54 ขอขอบคุณนักวิจัย นักวิชาการ คณาจารย์ที่ได้นำผลงานมาเสนอ และผู้ที่สนใจเข้าร่วมการประชุมทางวิชาการในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการทุกฝ่ายที่สละเวลา แรงกาย แรงใจและความคิด ร่วมมือกันจัดเตรียมการประชุม จนทำให้การประชุมทางวิชาการครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ลิลลี่ กาวีต๊ะ)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54

ความสมบูรณ์ของการเสนอผลงาน
ในการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 54
ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประกอบด้วย หนังสือรับรองการมาเสนอผลงาน
และการได้ตีพิมพ์ลงในเรื่องเต็มฉบับสมบูรณ์

ฝ่ายบริการการศึกษา สำนักทะเบียนและประมวลผล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร. โทรสาร 0 2118 0145

E-mail: annualconference@ku.ac.th

สารบัญ

สาขาวิทยาศาสตร์ (Subject: Science)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. วท.2/O13 Statistical Analysis of Zero Inflated Negative Binomial-beta Exponential Distribution 1

   By Chanakarn Jornsatian Winai Bodhisuwan and Mena Patummasut

2. วท.10/O57 การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งาน..... 9

   Removal of Cadmium from the Synthetic Wastewater by Spent Cationic Resin

   โดย อานนท์ จริยนรเศรษฐ์ รุจา สุวรรณสุข วชิระ พิมพ์ปราโมทย์ กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ และพันธวัศ สัมพันธ์พานิช

3. วท.13/O81 On the Truncated Beta-Pareto Distribution 17

   By Atchariya Watthanawisut Winai Bodhisuwan and Mena Patummasut

4. วท.17/O113 An Overview of Neutron Activation Analysis (NAA) at Thai Research Reactor (TRR-1/M1) 25

   By Jatechan Channuie Supalak Kongsri Sarinrat Wonglee Wichian Ratanatongchai Sasiphan Khaweerat Roppon Picha Kotchaphan Kanjana Thiansin Liamsuwan Kampanart Silva Jiraporn Promping Chanatip Tippayakul and Dumrongkiat Srilachai

5. วท.18/O119 การสร้างภาพ 3 มิติ ด้วยโฮโลแกรมรอยขีด..... 33

   Three-Dimensional Image Construction by Scratch Hologram

   โดย สิริพร ท้วมไทย กฤษกร หาญชนะ และมยุรี หาญสุภานุสรณ์

6. วท.29/O216 Effects of Leaf and Rhizome Extracts of *Typha angustifolia* L. on Seed Germination and Seedling Growth of Giant Mimosa (*Mimosa pigra* L.)..... 41
By Phetphan Namwat Ornusa Khamsuk and Srisom Suwanwong

7. วท.31/O231 การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง.....47
Preparation and Characterization of VN Thin Films Deposited by Reactive DC Magnetron Sputtering Method
โดย จงรัก บ่อทรัพย์ สุรสิงห์ ไชยคุณ และนิรันดร์ วิทิตอนันต์

8. วท.37/O241 การทดลองอย่างง่ายสำหรับสาธิตแสงเขียววาบในบรรยากาศ.....55
A Simple Experiment for Demonstration of Green Flash in Atmosphere
โดย มยุรัตน์ ตั้งวิชัย กัลยารักษ์ รักษ์ผล และมยุรี หาญสุภานุสรณ์

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. วท.1/P3 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว) ในข้าวไทย..... 65
Determination of Heavy Metals (Cd, Cr and Pb) in Thai Rice
โดย วิภาดา ศิริอนุสรณ์ศักดิ์ ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม และรัฐธิภา ธนารักษ์

2. วท.3/P191 การวิเคราะห์แนวโน้มความยาวนานแสงแดดระหว่างปี 1958 และ 2012 สำหรับจังหวัดนครสวรรค์.....72
Trend Analysis of Sunshine Duration between 1958 and 2012, Nakhon Sawan Province
โดย ศุภวัฒน์ วิสิฐศิริกุล

3. วท.4/P24 Electrical Properties of n-ZnSe/p-Si (100) Heterojunction Thin Film Device ……..……78

By Chaniporn Juthaisong Thitinai Gaewdang and Ngamnit Wongcharoen

4. วท.6/P37 การวิเคราะห์การแสดงออกของยีนในสบู่ดำภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง.....86

Expression Analysis of Waterlogging Responsive Genes in *Jatropha curcas* L.

โดย รัชนีภรณ์ พิมพ์จันทร์ และปิยะดา จันทวงศ์

5. วท.7/P38 ผลของการปรับสภาพยอดปาล์มน้ำมันโดยการหมักเอนไซลิงซ์ด้วยเชื้อ *Lactobacillus plantarum*.……..…….. 94

Effect of Pretreatment on Oil Palm Shoots by Ensiling with *Lactobacillus plantarum*

โดย อังคณาวิสุ มณีนวล สมพงศ์ โอทอง และนันทรัตน์ พฤกษาพิทักษ์

6. วท.9/P56 การผลิตเซลลูโลสจากน้ำคั้นยอดปาล์มน้ำมันโค่นทิ้งเพื่อการปลูกใหม่โดยเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086.…..... 102

Cellulose Production from Oil Palm Shoot Juices Felled for Replanting by *Acetobacter xylinum* TISTR 086

โดย เฉลิมเกียรติ แก้วนุ่น สมพงศ์ โอทอง และนันทรัตน์ พฤกษาพิทักษ์

7. วท.11/P65 การแยกและการศึกษาคุณสมบัติโปรไบโอติกของแลคติกแอซิดแบคทีเรียจากปลาส้ม.…….....……110

Isolation and Preliminary Determination of Probiotic Properties of Lactic Acid Bacteria from Pla Som

โดย ปาริชาติ พุ่มขจร กมลรส กำแพงนิล อรอนงค์ โพธา ชิดชนก ดวงแก้ว และพงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ

8. วท.12/P78 การผลิตถ่านกัมมันต์จากชีวมวลเปลือกมังคุดเพื่อกำจัดโลหะหนัก…….. 119

Production of Activated Carbon from Mangosteen Shell Biomass for Heavy Metal Removal

โดย สัมพันธ์ สร้อยกล่อม อัจฉรา แสนฟ้างำ จุฑามาศ ทิพย์เนตร และโสภา กลิ่นจันทร์

9. วท.14/P91 การเตรียมโวลลาสโทไนต์กลาสเซรามิกจากเปลือกไข่ เพอร์ไลต์ และเศษแก้ว..... 126
Fabrication of Wollastonite Glass-Ceramics from Eggshell Perlite and Waste Glass
โดย ปฏิภาณ หนักคำ พรพิมล เขียวภูมี และนภัสถ์ จันทร์มี
10. วท.15/P192 การศึกษาพารามิเตอร์กายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น.....134
The Study of Physical Parameters Affecting on the Temperature Inside the Cement Rounds for Bhutan Oyster Mushroom Cultivation Based on the Pot-in-Pot Refrigerator Model
โดย นานทรี หุ้นเหี้ยง วิโรจน์ เครือภู่ และอรรถพล เชยศุภเกตุ
11. วท.22/P126 การเปลี่ยนน้ำมันเครื่องใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง..... 143
Conversion of Used Lubricating Oil to Liquid Fuels on Used FCC Catalyst in Continuous Reactor
โดย พรชนก แก้วเทวี และธราพงษ์ วิทิตศานต์
12. วท.23/P128 ปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล..... 151
Improved the Performance of Dye-sensitized Solar Cells by Polyethylene Glycol
โดย กัญญารัตน์ เปล่งสันเทียะ และสุภาพร ดาวทอง
13. วท.25/P148 การศึกษาความสามารถของแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรีในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช.....159
A Study on Plant Growth Promoting Activity of the Haloalkaliphilic Bacteria Isolated from Alkaline Soil in Kanchanaburi Research Station
โดย จันทร์แรม รูปขำ สาวิตร ตระกูลน่าเลื่อมใส
ธนภูมิ มณีบุญ ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม และน้ำผึ้ง อนุกูล

14. วท.28/P157 Surface Analysis of Polyethylene Film Modified via Ceric ion-induced Grafting of Acrylamide ……..... 167
By Thirawan Nipithakul and Kulsinee Sintasanai
15. วท.30/P168 การเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ส่วน Open Reading Frame ของยีนไวเทลโลเจนิน จากเพลี้ยอ่อนมะเขือ (*Aphis gossypii* Glov) และเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาว (*Aphis craccivora* Koch)..... 175
Comparative Open Reading Frame (ORF) Sequences of the *vitellogenin* Gene between *Aphis gossypii* Glov and *Aphis craccivora* Koch
โดย ศุภวรรณ เรืองพุฒ และเลิศลักษณ์ เงินศิริ
16. วท.32/P177 ผลของสารอาหารไนเตรทกับการทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังของสบู่ดำ…..... 180
The Effect of Nitrate Supplementation in Waterlogging Tolerance of Jatropha
โดย ภัทราลักษณ์ ส่งเสริม และปิยะดา จันทวงศ์
17. วท.33/P178 อุทกธรณีเคมี ของแอ่งน้ำบาดาลแพร่ ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม……..... 188
Hydrogeochemistry of Groundwater of the Phrae Basin in the Yom Catchment Area
โดย ปีย์วรา เจริญนา และกัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ
18. วท.34/P179 ฟิสิกส์ของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าและหม้อ…..... 196
Physics of Induction Cookers and Pots
โดย รังสรรค์ กรีกูล และวันดี อ่อนเรียบร้อย
19. วท.38/P188 การผลิตและการศึกษาคุณสมบัติของโมโนโคลนอลแอนติบอดีที่มีความจำเพาะต่อ *Campylobacter jejuni* ….. 204
Production and Characterization of Monoclonal Antibody Specific to *Campylobacter jejuni*
โดย วรกนก กนกลดารมย์ ประเวทย์ ตุ้ยเต็มวงศ์
ชัยวัฒน์ กิตติกุล และฆรณี ตุ้ยเต็มวงศ์

สาขาพันธุวิศวกรรม (Subject: Genetic Engineering)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. พว.2/O71 Statistics and Interpretation of Non-B DNA Sequence Motifs in TTSMI Database 215

   By Piroon Jenjaroenpun Vladimir A. Kuznetsov and Kiattawee Choowongkomon

2. พว.3/O109 Isolation and Characterization of Thermotolerant *Komagataeibacter* Species for Bacterial Cellulose and Acetic Acid Production at High Temperature 224

   By Kallayanee Naloka Pattaraporn Rattanawaree and Gunjana Theeragool

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. พว.1/P57 การพัฒนาชุดตรวจสอบโปรตีน CRY9C โดยอิมมูโนโครมาโตกราฟี.....235

   Development of CRY9C Protein Rapid Detection via GICA

   โดย พงศกร สรรค์วิทยากุล ขนิษฐา วงศ์วัฒนารัตน์ ปิยรัตน์ ธรรมกิจวัฒน์ ประเสริฐ วงศ์วัฒนารัตน์ และศรีเมฆ ชาวโพงพาง

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ (Subject: Architecture and Engineering)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. สถ.วศ.2/O11 การศึกษาแหล่งความร้อนเชิงเหนี่ยวนำเพื่อใช้กับการอบแห้ง.....247

   Study of Induction Heating Source for Drying Application

   โดย จีระพงศ์ ศรีวิชัย

2. สถ.วศ.3/O18 สมบัติความเสียดทานและการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบฟีนอลิกที่เติมผงเถ้าจากธรรมชาติ.....255

   Friction and Wear Properties of Natural Ash-Filled Phenolic Based Composites

   โดย เสาวภา ชูศรี เอกชัย วิมลมาลา ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และศิรินทร ทองแสง

3. สถ.วศ.5/O24 ผลกระทบของอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่มีต่อประสิทธิภาพของเทอร์โบชาร์จเจอร์.....263
Impacts of Lubricant Temperature on Turbocharger Efficiency
โดย สุเมธ ไสยผอม สถาพร เชื้อเพ็ง และสืบสกุล คุรุรัตน์
4. สถ.วศ.6/O25 เสถียรภาพของการเผาไหม้เอทานอลแบบเปียกที่รอบเดินเบาภายใต้สภาวะส่วนผสมบางในเครื่องยนต์แก๊สโซลีน..... 270
Stability of a Hydrous Ethanol Combustion at Idling under Lean Condition in Gasoline Engine
โดย สุเดชา ศรีสุวรรณ สถาพร เชื้อเพ็ง และสืบสกุล คุรุรัตน์
5. สถ.วศ.7/O26 Ultrasound – Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Indigenous Vegetables In Southern Thailand 278
By Supasit Chooklin Armenah Boojan
Darunee Rodruayruen Weerapong Chiansong
and Sutasinee Sriwilai
6. สถ.วศ.10/O32 สมบัติการคงรูป เชิงกล และการกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้.....287
Cure Characteristics, Mechanical and Neutron/Gamma Shielding Properties of Wood-Natural Rubber Composites
โดย กีรติกานต์ นิลยอง เอกชัย วิมลมาลา
ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และเกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง
7. สถ.วศ.11/O37 การสร้างและประเมินเครื่องยีน้ำตาลโตนดผง..... 295
Manufacturing and Evaluation of the Jaggery Powder Crusher Machine
โดย วิมล บุญรอด สุจริต สิงหพันธุ์ และฤทัย ประทุมทอง
8. สถ.วศ.12/O38 การศึกษาแบบจำลองของผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของรถกระบะบรรทุกที่ติดตั้งถังก๊าซธรรมชาติด้วยโปรแกรม IPG CARMAKER..... 303
A Simulation Study of the Position-Changed Effects on the Center of Gravity of Natural Gas Pickup Truck by IPG CARMAKER Software Package
โดย พุฒิพร ภาคสุโพธิ์ และเอกไท วิโรจน์สกุลชัย

9. สถ.วศ.14/O43 การออกแบบและสร้างเครื่องยีผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร…….....311
Design and Construction of Palmyra Palm Crushing Machine for Food Processing
โดย อรุณ สุขแก้ว วิมล บุญรอด และสุจริต สิงหพันธุ์
10. สถ.วศ.18/O55 ผลของแสงสว่างที่มีต่อการเปลี่ยนสีของไส้กรอกหมูในระหว่างการจัดเก็บ….319
Effect of Illumination on Color Changes in Cooked Pork Sausages During Storage
โดย ขวัญชัย ชอบสำราญ เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ
ทวีพล ซื่อสัตย์ และนวภัทรา หนูนาค
11. สถ.วศ.21/O74 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของการย่างของเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้…….... 327
Effects of Grilling Temperature and Time of the Automatic Infrared Grilling Machine on Quality of Pork-Skewer Products
โดย เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ
12. สถ.วศ.22/O76 การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการตัดก้อนยางวัตถุดิบให้ได้น้ำหนักตามค่าที่กำหนด เพื่อผลิตยางล้อจักรยานยนต์……..……... 335
Efficiency Improvement of Rubble Bale Cutting with Specific Weight for Motorcycle Tire Production
โดย ชัชพันธ์ ขำญาติ
13. สถ.วศ.23/O84 การตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิตโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง……343
Inspection of Orifice Plate Flatness Using Laser Light Techniques
โดย ภฑิล อัครกูรวิชญ วิทยา ทิพย์สุวรรณพร
และทวีพล ซื่อสัตย์
14. สถ.วศ.24/O260 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วในจังหวัดจันทบุรี…... 352
Life Cycle Assessment of Melon in Syrup in Chanthaburi Province
โดย สุภิญญา เสือสะอาด และปุณณมี สัจจกมล

15. สถ.วศ.25/O111 การศึกษาการเปรียบเทียบระบบจำหน่ายไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อลดความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมด…….…… 360
Comparing the Distribution of Electrical System at the Industrial Factory to Reduce Cost and Losses of Transformers by Using Total Ownership Cost Analysis Technique
โดย รัญชน์ อมดวง วิชัย สุระพัฒน์ และนพดล คะเตปะนานนท์

16. สถ.วศ.26/O115 การศึกษาการเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน ด้วยวิธีการทดสอบแบบระนาบเอียง……... 368
A Study of Tracking on Insulating Surface with an Inclined Plane Test
โดย จิรวดี กัลยาเรือน และวินัย พฤกษะวัน

17. สถ.วศ.30/O128 โรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า…… 376
Hybrid Drying House Using Solar Dryer and Electricity
โดย วันไชย คำเสน อำนาจ ผัดวัง ชูธง สัมมัตตะ จิรพนธ์ ทาแกง พงศกร สุรินทร์ และสรายุทธ มาลัยพันธุ์

18. สถ.วศ.33/O138 การกำหนดเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการจัดสมดุลและวางแผนทรัพยากรโดยการจำลองสถานการณ์ในฝ่ายควบคุมคุณภาพโรงงาน……..…….. 384
Determining of an Optimal Conditions for Work Balancing and Manpower in Quality Control Department Using Simulation Approach
โดย ภรภัทร แก้วเขียว สุริยพงศ์ นิลสังข์ และชุมพล ยวงใย

19. สถ.วศ.34/O261 การวิเคราะห์โซ่คุณค่าเมล่อนในจังหวัดจันทบุรีและฉะเชิงเทรา…….. 392
The Value Chain Analysis of Melon in Chanthaburi and Chachoengsao Province
โดย ชฎารัตน์ เตชอยู่สุขเจริญ และปุณณมี สัจจกมล

20. สถ.วศ.35/O143 การพัฒนาเครื่องมือสำหรับทดสอบพฤติกรรมการจุดติดไฟของวัสดุ……..400
A Development of Ignition Behavior of Materials Testing Apparatus
โดย วรวิช มณฑาทิพย์ และณัฐศักดิ์ บุญมี

21. สถ.วศ.36/O151 การควบคุมรอบเดินเบาเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่..... 407
Idle Speed Control of Dual Fuel Diesel Engine with Natural Gas Using Fuzzy Controller
โดย กิตติพงษ์ เยาวาจา และวิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย
22. สถ.วศ.38/O154 การสร้างน้ำค้างด้วยเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก.....415
Dew Formation from Thermoelectric Cooler
โดย ฐิติพงศ์ กุฎีพันธ์ พิชญ์นรี ลลิตาภรณ์ และมณฑล ฐานุตตมวงศ์
23. สถ.วศ.39/O174 การควบคุมปริมาณการจ่ายสารส้มในกระบวนการผลิตน้ำประปา ด้วยเครื่องเอสซีเอ็ม..... 422
Control of Alum Dose in Water Treatment Process with Streaming Current Monitor (SCM)
โดย กุลภา คงมีเงิน มณฑล ฐานุตตมวงศ์ และสมศักดิ์ ปัสนานนท์
24. สถ.วศ.40/O175 การพัฒนาแบบจำลองปริมาณน้ำหลากในลุ่มน้ำน่าน.....429
Development of Flood Routing Models for Nan River Basin
โดย ภัทรวุฒิ พงศ์วุฒิศักดิ์ และวินัย เลียงเจริญสิทธิ์
25. สถ.วศ.42/O179 การลดความเค้นหนาแน่นของแผ่นสี่เหลี่ยมมีรูตรงกลางภายใต้แรงดึงตาม แนวแกนโดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์..... 437
The Reduction of Stress Concentration in a Rectangular Plate with a Central Circular Hole under Axial Tension Force Using Finite Element Method
โดย วัชระ เครือรัฐติกาล กรรมมันต์ ชูประเสริฐ และชาญเวช ศีลพิพัฒน์
26. สถ.วศ.44/O189 ผลกระทบจากความสูงของชั้นเชื้อเพลิงที่มีต่อการเผาไหม้ถ่านกะลา มะพร้าวอัดแท่งภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้น..... 446
Effect of Bed Depth on Characterization of Coconut Shell Charcoal in an Updraft Gasifier
โดย ภัทรพงษ์ คงได้ ปฤษฎฤต สารพร วิชัย ศิวะโกศิษฐ และชินธันย์ อารีประเสริฐ

27. สถ.วศ.47/O195 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงปอกต่อความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยใช้การออกแบบการทดลอง..... 454
The Study of Optimum Condition for Turning on Surface Roughness of Aluminum Casting Semi-Solid Grade 6061 Using Experimental Design
โดย สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ชาตรี หอมเขียว วรรธนพร ชีววุฒิพงศ์ และรอมฎอน บูระพา
28. สถ.วศ.48/O196 อิทธิพลของประเภทคาร์บอนและเวลาการดูดซับโลหะต่อสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/C สำหรับปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันของเอทานอลในด่าง..... 463
Influence of Carbon Support Type and Metal Adsorption Time on Performance of Pd/C Catalyst for Ethanol Electro-Oxidation in Alkaline
โดย ประภาพรรณ ไลวรรณ์ อภิชัย เทอดเทียนวงษ์ และสุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์
29. สถ.วศ.50/O207 การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการพัฒนาเส้นทางจักรยานในพื้นที่กลุ่มกรุงเทพฯ เหนือ..... 471
Stakeholder Participation in Bike Route Development in Northern Bangkok Area
โดย สุภาพร แก้วกอ เลี่ยวไพโรจน์ ธนภณ พันธเสน พัฑรา สืบศิริ และบาธ ลัมเบร็กส์
30. สถ.วศ.52/O262 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์สับปะรดแปรรูปในกระป๋อง.....479
Life Cycle Assessment of Canned Pineapple Product
โดย หัทยา ทรงนิรันดร และปุณณมี สัจจกมล
31. สถ.วศ.53/O218 การทดสอบกำลังเฉือนระหว่างดินกับใยสังเคราะห์ในสภาวะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ.....487
Shear Strength of Soils with Geotextiles Test in Saturated and Unsaturated Conditions
โดย ณัฐพัชร์ ฤกษ์ชัยศรี และอภินิติ โชติสังกาศ

32. สถ.วศ.54/O221 การตรวจหาการดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนและการวางแผนบำรุงรักษา……..…..495
Determination of PD Occurrence in Combustion Type Turbine Generator and Maintenance Planning
โดย ถิรวุฒิ วงศ์สาลี ธงชัย นิวิฐจรรยงค์ และวินัย พฤกษะวัน
33. สถ.วศ.55/O226 การศึกษาปัจจัยการแยกเนื้อน้อยหน่าโดยใช้วิธีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง…..... 503
Study on Parameters of Centrifugal Pulping Machine for Sugar Apple
โดย สาทิป รัตนภาสกร และสมัคร รักแม่
34. สถ.วศ.56/O227 ปัญหาของการพัฒนาโครงการภาครัฐที่เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน กรณีศึกษา โครงการพัฒนาแหล่งน้ำภายใต้การดำเนินงานของกรมชลประทาน…… 511
Problems in Development for Sustainable Government Project A Case Study of Water Resources in Royal Irrigation Department (RID)
โดย ปรเมนทร์ ขะพินิจ และปิยนุช เวทย์วิวรณ์
35. สถ.วศ.59/O232 การออกแบบอุปกรณ์หยุดน้ำภายในท่อจ่ายน้ำชั่วคราว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพงานภาคสนามของการประปานครหลวง…… 519
Design of Temporary Water Stopping Inside of a Distribution Pipe to Enhance Field Activity of Metropolitan Waterworks Authority (MWA)
โดย บุญลือ สิงห์บุบผา และสุพรรณ กุลพาณิชย์
36. สถ.วศ.60/O233 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของบ๊วยเค็มเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องขูดแยกเนื้อบ๊วยเค็มต้นแบบ…… 527
Study on Physical Properties for Design and Creation of Salted Plum Scrape Machine Prototype
โดย สิทธิพร มณีวรรณ สุดสายสิน แก้วเรือง
บัญญัติ เศรษฐฐิติ และศุภกิตต์ สายสุนทร

37. สถ.วศ.62/O238 การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพและประสิทธิภาพในงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วระหว่างการประปานครหลวงและบริษัทจ้างเหมา..... 534
Comparison of Quality and Efficiency of Leaked Pipe Repair Work between Metropolitan Waterworks Authority (In-house) and the Subcontractor (Outsource)
โดย ศุภพัชรี จิตระวัง และปิยนุช เวทย์วิวรณ์
38. สถ.วศ.65/O242 การศึกษาผลของการใช้เชื้อเพลิงควบคู่ระหว่างถ่านอัดแท่ง และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด สำหรับเตาชีวมวลชนิดไหลขึ้น.....542
Updraft Co-Gasification of Wood Pellet and Charcoal Effect of Fuel Mixing on Important Parameters
โดย ปฤษธฤต สารพร ภัทรพงษ์ คงได้ วิชัย ศิวะโกศิษฐ และชินธันย์ อารีประเสริฐ
39. สถ.วศ66/O246 อุปสรรคในการดูแลรักษาอาคารในมุมมองของผู้ดูแลอาคาร: กรณีศึกษาอาคารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....552
Barrier to Building Maintenance in Facilitator Vision: A Case Study of Kasetsart University
โดย ฐิติพงศ์ สุขเสริม และปิยนุช เวทย์วิวรณ์
40. สถ.วศ.67/O247 การศึกษาผลกระทบของตัวความต้านทานปรับหน้าคลื่นที่มีผลต่อค่าแรงดันพุ่งเกินของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs 561
The Effects of the Front Resistor that Affect Overshoot of 1.2/50 μs Impulse Voltage Waveform
โดย กวิตม์ มีเจริญ และศุภกิตติ์ โชติโก

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. สถ.วศ.9/P33 การออกแบบและพัฒนาระบบรักษาตำแหน่งและหลบหลีกการชนสำหรับอากาศหลายใบพัด ในสภาพแวดล้อมที่กำหนด โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ..... 573
Design and Development of the Position Holding and Collision Avoidance System for Multirotor in a Fixed Environment Using Image Processing Techniques
โดย ธนกร ขำวิไล ภานุกร แซ่ตัน และไชยวัฒน์ กล่ำพล

2. สถ.วศ.15/P199 การศึกษาพฤติกรรมสัญญาณทรานเซี้ยนต์จากชุดทดสอบสัญญาณทรานเซี้ยนต์ ในระบบคาปาซิเตอร์แบงค์…….....581
Transient Behavior Study from Transient Test Set in Capacitor Bank System
โดย อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล สันติพนธ์ อนันต์วัฒนาพร
ชายชาญ โพธิสาร สัณฐิติ อยู่มาก
และธีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ
3. สถ.วศ.17/P198 Design and Development of a Modal Testing Machine for Aircraft Components ……..... 589
By Yossanan Korsakulpanich and Chaiwat Klampol
4. สถ.วศ.27/P206 ระบบตรวจสอบคุณภาพของกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีเลเซอร์สแกน……..…….. 597
Inspection Glue Route Quality in HDD Top Cover Assembly Using Laser Scanning
โดย บัญชา จิตสงค์ และทวีพล ซื่อสัตย์
5. สถ.วศ.28/P203 การศึกษารูปแบบการไหลของของไหลผ่านวัตถุรูปวงกลม..... 605
Study of Flow Characteristics Around a Circle
โดย จิรโรจน์ บูรณะโรจน์ และสืบสกุล คุรุรัตน์
6. สถ.วศ.29/P115 การพัฒนาดัชนีวัดความสำเร็จการพัฒนาแหล่งน้ำของสำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลาง กรมชลประทาน…….. 613
Key Performance Indicators for the Office of Medium Scale Water Resources Development, Royal Irrigation Department
โดย พงศกร มีบุษยา และปิยนุช เวทย์วิวรณ์
7. สถ.วศ.31/P117 การวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องคูลลิ่งโมดูลสำหรับตู้ควบคุม…….. 621
An Analysis and Improvement Performance of the Cooling Module for Controller Cabinet
โดย ยุทธภูมิ โพธิ์อาศัย และสมพงษ์ พิเชฐภิญโญ

8. สถ.วศ.43/P200 การเลือกชนิดตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับประเภทตัวกลาง ฟองน้ำยางพารา ฟองน้ำโพลิยูรีเทน และฟองน้ำเมลามีนในการเลี้ยงเชื้ออนาม็อกแบบไบโอฟิล์ม..... 629
Suitable Medium Selection for Latex Foam, Polyurethane Foam and Melamine Foam of Biofilm Anammox Cultures
โดย แพรวพรรณ มณีวรรณ พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และศิริพร ลาภเกียรติถาวร

9. สถ.วศ.46/O202 ระบบควบคุมและติดตามสภาพแวดล้อมเพื่อการเกษตรผ่านสมาร์ทดีไวซ์....638
Environment Monitoring and Control for Agriculture via Smart Device
โดย ศศิมาภรณ์ มงคลพิทักษ์ และทวีพล ซื่อสัตย์

10. สถ.วศ.49/P205 แนวทางการควบคุมปริมาณความสูญเสียของวัสดุในการก่อสร้างงานอาคารด้วยวิธีวิเคราะห์ผลงานที่ทำได้.....646
Guidelines in Controlling Material Wastes in Building Construction by Earned Value Analysis Method
โดย วุฒิชัย ด่านกลาง และเทอดธิดา ทิพย์รัตน์

11. สถ.วศ.57/P201 การลดความกระด้างของน้ำบาดาล กรณีศึกษาน้ำบาดาลก่อนเข้าหอหล่อเย็นของอุตสาหกรรมพลาสติก.....654
Hardness Reduction of Groundwater Case Study Groundwater Used in a Cooling Tower of Plastic Industry
โดย สุพัตรา บุตรเสรีชัย ยุวรัตน์ เงินเย็น กุญชร ผ่องแผ้ว ภุชงค์ พุ่มทองดี และกนกวรรณ กกรัมย์

12. สถ.วศ.58/P182 ผลกระทบแรงดันและเวลาในการต่อชนต่อความแข็งแรงและการสูญเสียเนื้อวัสดุจากการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหล็ก S45C and SS400.....662
Effect of Pressing Force and Time on the Welding Strength and Material Loss of the Friction Welding between S45C and SS400 Steel
โดย สายันต์ เอี่ยมพรธนิต องค์การ บุนนาค ณฤพล อังคสุวรรณ และราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ

13. สถ.วศ.61/P204 การติดตามการเจริญเติบโตพืชด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์.....670
The Growth of Plants Tracking Based on Computer Vision
โดย วิทยา ศรีกุล ประจวบ อินระวงศ์ และสนั่น จันทร์พรม

สาขาสาขาอุตสาหกรรมเกษตร (Subject: Agro-Industry)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. อก.12/O65 Lethality and Quality Evaluation of In-Packaged Ready-To-Eat Cooked Jasmine Rice Subjected to Industrial Continuous Microwave Pasteurization..... 679
By Thammanoon Auksornsri and Sirichai Songsermpong

2. อก.20/O95 Distribution Channel of Imported Halal Foods to Jakarta, Indonesia...687
By Megita Ryanjani Tanuputri Ravipim Chaveesuk and Adi Djoko Guritno

3. อก.22/O99 Production of Freeze-Dried Mao Juice Powders and their Functional Properties..... 696
By Wetanee Suravanichnirachorn Withida Chantrapornchai Vichai Haruthaithanasan Suntaree Suwonsichon Udomlak Sukatta and Thanapoom Maneeboon

4. อก.25/O131 การศึกษาพฤติกรรม วิถีชีวิต และปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้ออาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยวของผู้บริโภคในประเทศอินโดนีเซีย.....704
The Study of Consumption Behavior, Lifestyle and Factors Affecting Decision to Purchase Halal Snack Food in Indonesia
โดย ณภัทร วุฒิเกรียงไกรกุล และอัจฉรา เกษสุวรรณ

5. อก.29/O156 การศึกษาพฤติกรรม วิถีการดำเนินชีวิต และปัจจัยทางการตลาดที่มีผลต่อการซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องของชาวอินโดนีเซีย.....713
The Study of Consumption Behavior, Lifestyle and Marketing Factors Affecting Decision to Purchase Halal Canned Fish of Indonesian Consumers
โดย อารีรัตน์ เกษมวุฒิ และอัจฉรา เกษสุวรรณ

6. อก.36/O164 สมรรถนะของโซ่อุปทานอุตสาหกรรมอาหารฮาลาลไทย..... 721
Thai Halal Food Supply Chain Performance
โดย ธรรมรัตน์ ปิ่นสากล และรวิพิมพ์ ฉวีสุข

7. อก.43/O215 การพยากรณ์ราคาผักเมืองหนาว ณ ตลาดสี่มุมเมือง..... 730
Price Forecasting of Temperate Vegetable on Si Mum Muang Market
โดย พูนสิริ ยิ้มหนองโพ และปรารถนา ปรารถนาดี

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. อก.1/P8 การปรับปรุงการต้านน้ำของกระดาษสาโดยกลูโคแมนแนน..... 741
Water Resistance Improvement of Saa Paper by Glucomannan
โดย วุฒินันท์ คงทัด สุธีรา วิทยากาญจน์
และรัตนา ตันฑเทอดธรรม

2. อก.2/P11 ผลของสายพันธุ์ต่อสารให้กลิ่นระเหยในเนื้อและน้ำเม่า..... 749
Effect of Variety on Volatile Aroma Compounds in Mao Pulp and Juice
โดย วันเพ็ญ จิตรเจริญ ลัดดาวัลย์ ปาปิน ธัญลักษณ์ บัวผัน
และลชินี ปานใจ

3. อก.3/P12 สารให้ความคงตัวที่เหมาะสมต่อคุณภาพของไวน์ลิ้นจี่..... 757
Stabilizing Agents Appropriated for Lychee Wine Quality
โดย นราทิพย์ คิดคร่อง วันเพ็ญ จิตรเจริญ
และวิรัญญา กันทวงศ์

4. อก.4/P31 ผลของสารสกัดจากสาหร่ายผมนางต่อคุณลักษณะของไส้กรอกปลาอิมัลชัน 765
Effect of *Gracilaria fisheri* Extract on Characteristics of Fish Emulsion Sausage
โดย ภัทิรา สุดเลิศ และวรางคณา สมพงษ์

5. อก.8/P49 การศึกษาศักยภาพของการใช้เส้นใยเซลลูโลสสำหรับเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิท..... 773
The Potential of Cellulose Fibers Usage as Reinforcement for Composite Materials
โดย รังสิมา ชลคุป วุฒินันท์ คงทัด สุธีรา วิทยากาญจน์ วีรศักดิ์ สมิทธิพงศ์ ชนาพร งามโรจน์ และจิรชยา บุญญฤทธิ์

6. อก.9/P50 การปรับปรุงกระบวนการอบแห้งของโรงหีบน้ำมันปาล์มดิบขนาดเล็กเพื่อเพิ่มค่าโดบี้ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด.....781
Drying Process Improvement of Small Crude Palm Oil Mill for DOBI Increasing to Meet the Standard Requirement
โดย รยากร นกแก้ว วันลภ อารีรบ และวิทยา ปั้นสุวรรณ

7. อก.10/P55 สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการสกัดแคโรทีนอยด์จากฟักข้าว (*Momordica cochinchinensis*)..... 789
The Optimal Pretreatment of Gac Fruit (*Momordica cochinchinensis*) for Carotenoid Extraction
โดย สุภัสสรา เนตรน้อย และทานตะวัน พิรักษ์

8. อก.11/P59 การห่อหุ้มเซลล์ของโปรไบโอติก *Lactobacillus plantarum* SKI19 และการประเมินความสามารถในการทนต่อสภาวะของกรดในกระเพาะอาหาร....797
Encapsulation of Probiotic *Lactobacillus plantarum* SKI19 and Evaluation of the Gastrointestinal Transit Tolerance
โดย อภิชาติ อู๋ไพจิตร สุธาศิน นิลเพชร และอ้อมใจ ช่อกุหลาบ

9. อก.13/P67 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดงจากเชื้อรา *Monascus purpureus* ในเครื่องโคจิโดยใช้วิธีทากูชิ..... 807
Optimization Condition for Red Pigment Production from *Monascus purpureus* in Koji Machine by the Taguchi Method
โดย วีระสิทธิ์ กัลยากฤต ปวีณา สุขสำราญ ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์ มังกร โรจน์ประภากร และวิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา

10. อก.14/P70 การยับยั้งการเจริญ *Aspergillus* spp. ที่แยกได้จากข้าวด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์.....815
Growth Inhibitory of *Aspergillus* spp. Isolated from Rice by Chlorine Dioxide Fumigation
โดย วราภา มหากาญจนกุล พรรณรพี เอี่ยมทวีเจริญ กิตติศักดิ์ อินทร์เสวก ธนภูมิ มณีบุญ และชนัญญา ช่วยศรีนวล

11. อก.15/P84 การพัฒนาบรรจุภัณฑ์กระดาษต้านเชื้อราเคลือบน้ำมันหอมระเหยจากใบยูคาลิปตัสและเสม็ดขาวเพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะม่วง.....824
Development of Antifungal Paper Packaging Coated with Eucalyptus and Cajuput Oil for Extending Shelf-Life of Mango
โดย ชัยพร สามพุ่มพวง อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ ประภัสสร รักถาวร และสุธีรา วิทยากาญจน์

12. อก.16/P92 สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของสารให้กลิ่นสำคัญของใบมะกรูดด้วยสตาร์ชถั่วเขียวและการปลดปล่อยที่ค่าพีเอชต่างกัน.....832
Inclusion Complexes of Aroma Active Compounds of Kaffir Lime Leaves with Mung Bean Starch and their Release at Various pH Values
โดย ณฐิฒา รอดขวัญ และวรรณี จิรภาคย์กุล

13. อก.18/P95 การยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในห้องน้ำสาธารณะด้วยน้ำมันหอมระเหยพลู น้ำมันหอมระเหยพลูผสมกับน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพร และสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่มีน้ำมันหอมระเหยพลูเป็นองค์ประกอบหลัก.....840
Antimicrobial Activities of Betel Oil, Mixed Betel Oil with Herbal Essential Oil, Essential Oils Recipe Contained Betel Oil as Main Ingredient Against Microorganism Contaminated in Public Toilets
โดย ลลิตา คชารัตน์ ประภัสสร รักถาวร อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ และเกสรี กลิ่นสุคนธ์

14. อก.19/P96 การศึกษาคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระและยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวายบางชนิด..... 849
Free Radical Scavenging and Tyrosinase Inhibition Activities of *Dendrobium* Orchid Flower Extracts
โดย เกสรี กลิ่นสุคนธ์ อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ ประภัสสร รักถาวร และลลิตา คชารัตน์

15. อก.21/P101 ผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุต่างกันต่อสมบัติการต้านจุลชีพของยูจินอล 857
Effect of Different Ion Charge Surfactants on Antimicrobial Properties of Eugenol
โดย รชา เทพษร ชุดา ยุบลรัตน์ และสุภาภรณ์ ชื่นบุญชู

16. อก.23/P107 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักกรดอิทาโคนิกจากทะลายปาล์มน้ำมันโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง..... 865
Optimization of Itaconic Acid Fermentation from Oil Palm Empty Fruit Bunch Using Response Surface Methodology
โดย ปณิดา อู่ไทย พิลาณี ไวถนอมสัตย์ สาวิตรี จันทรานุรักษ์ อันฟาล ตาเละ และอันธิกา บุญแดง

17. อก.24/P118 ผลของไมโครเวฟต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์ข้าวแคบกึ่งสำเร็จรูป..... 872
An Effect of Microwave on Crispy and Salty Rice Cracker (Kao-Kab) Product
โดย บุษบา มะโนแสน จิรรัชต์ กันทะขู้ จริยา มามาตร และพรพรรณ ธิตา

18. อก.26/P119 ผลของความชื้นต่อคุณสมบัติการคั่วแตกของข้าวฟ่าง..... 879
Effect of Moisture Content on Popping Properties of Sorghum
โดย นพวรรณ นุ่มศิริ ธนวดี หนึ่งดวงกมล
ขวัญทิพย์ สนธยาสถาพร สวรินทร์ ทองแก้ว
และเยาวภา หล่อเจริญผล
19. อก.27/P193 ประสิทธิภาพของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์..... 887
Efficacy of Vanillin-Coated Paperboard on Microbial Inhibition
โดย พิมพ์วลัญป์ สมบูรณ์ ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์
และรังรอง ยกส้าน
20. อก.28/P194 การเปรียบเทียบผลการดำเนินงานของกองทุนรวมหุ้นระยะยาว (LTF) และ
กองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ (RMF) ที่บริหารโดยบริษัทหลักทรัพย์จัดการ
กองทุนที่ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์และบริษัทหลักทรัพย์จัดการ
กองทุนที่ไม่ได้ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์.....895
LTF and RMF Performance Comparison between Bank and
Non-Bank Affiliate Mutual Funds
โดย กัญญารัตน์ โพธิ์ศรีวิลัย และธนโชติ บุญวรโชติ
21. อก.30/P136 การวิเคราะห์สารระเหยให้กลิ่นในกลิ่นกะทิกลั่นระเหย.....905
Identification of Volatile Aroma Compounds in Evaporated Coconut
Milk Flavoring
โดย ณัฐณิชา กุลนานันท์ ภควรรณ มีศิริ
ธัญชนก ชำนิไพบูลย์ มยุรา บุตรภักดี
และเยาวภา หล่อเจริญผล
22. อก.31/P137 Induction of *Vibrio parahaemolyticus* into Viable but Nonculturable
State under Low Temperature and Nutrient Starvation..... 912
By Natcha Chyerochana Damkerng Bundidamorn
and Sudsai Trevanich

23. อก.32/P138 ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารยึดเกาะต่อคุณลักษณะของสับปะรดแผ่นใยอาหารสูง……... 920
Effects of Type and Concentration of Binders on Properties of High Fiber Pineapple Sheet
โดย สุริยาพร นิพรรัมย์ วิลาสินี ปีระจิตร ศุภฤกษ์ ฤกษ์ฤทัยรัตน์ และอรุณี บุญเชื่อง

24. อก.34/P195 การแบ่งกลุ่มผู้บริโภคอาหารฮาลาลนำเข้าในเมืองจาการ์ตา ประเทศอินโดนีเซีย……..……..... 928
Clustering of Consumers for Imported Halal Foods in Jakarta, Indonesia
โดย ชนาธินาถ ผาสุพรรณ์ และรวิพิมพ์ ฉวีสุข

25. อก.35/P196 ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์สมูทตี้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวงของผู้บริโภค ในเขตกรุงเทพมหานคร……..……938
Factors Affecting Consumer's Buying Decision of Smoothie Products from the Royal Project Foundation's Frozen Fruit in Bangkok Metropolis
โดย ณัฐนรี รังสิโยภาส และรวิพิมพ์ ฉวีสุข

26. อก.37/P142 Effect of Rice Flour Treated with Enzyme Hydrolysis and Heat-Moisture Treatment on Texture Quality and Thermal Properties of RiceCookies……..….. 947
By Niramon Whantongkhum and Prissana Suwannaporn

27. อก.39/P146 การคัดเลือกสายพันธุ์ยีสต์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการผลิตเบียร์ข้าว…….954
Selection of Potential Yeast Strains for Brewing Rice Beer
โดย ณัฐกานต์ กีสด อัมพิรา อินน้อย และอุลัยวรรณ์ วิทยเกียรติ

28. อก.40/P158 การเพิ่มคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ด้วยเทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่ง……... 962
Improvement on Antioxidant Properties of Brown Rice (Riceberry Cultivar) with Ultra Superheated Steam Technology
โดย ธนัญชนก คำไท้ และวรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ

29. อก.41/P160 การผลิตแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปรโดยวิธีการย่อยสลาย..... 970
Production of Sangyod Rice Flour by Hydrolysis Treatment
โดย พัทธ์ธิดา เพชรศร เพ็ญขวัญ ชมปรีดา
และวิชัย หฤทัยธนาสันติ์

30. อก.42/P165 Effect of Replacing Wheat Flour with Germinated Brown Rice Flour on the Quality of Cookies..... 978
By Sukhontha Sukhonthara

31. อก.44/P172 ผลของการให้ความร้อนด้วยเทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อคุณภาพของรำข้าว.....986
Effect of Ultra Superheated Steam Technology on Quality of Rice Bran
โดย สุธาสินี บุญมาวัตร และวรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ

32. อก.45/P173 สมบัติกายภาพของเส้นใยผักตบชวา สำหรับการปั่นเส้นด้าย O.E. ผสมเส้นใยผักตบชวาและฝ้าย.....994
Physical Properties of Water Hyacinth Fiber for O.E. Spinning Water Hyacinth/Cotton Fiber Blended Yarn
โดย รังสิมา ชลคุป จิรชยา บุญญฤทธิ์ วุฒินันท์ คงทัด
สุธีรา วิทยากาญจน์ และชนาพร งามโรจน์

33. อก.46/P176 การเปรียบเทียบการเจริญและการผลิตลิพิดระหว่าง *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 ในบ่อเปิดแบบรางคู่..... 1004
Comparison of Algal Growth and Lipid Production between *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 and *Chlorella sp.* IFRPD No.1092 in an Open Raceway Pond
โดย ภาณินี จรุงกีรติวิมล จารุวรรณ ชลสงคราม
วีระสิทธิ์ สรรพมงคลไชย สุมัลลิกา โมลากุล
และประมุข ภระกูลสุขสถิตย์

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Subject: Natural Resources and Environment)

ภาคบรรยาย (Oral Presentation)

1. ทส.7/O61 การจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียนโดยการมีส่วนร่วมของนักเรียน : กรณีศึกษาโรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม.....1015
Solid Waste Management in School by Students Participatory: A Case Study of Anubanwatpichaisongkram School
โดย สัตตบงกช ยอดแก้ว รัมภา พจนาคุณากร ศักดิ์ศรี รักไทย ภาณุชัย ประมวล และณัฐกร อินทรวิชะ

2. ทส.10/O73 คุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย จากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งและรุ่นสองของพื้นที่ลุ่มน้ำเขตเงาฝน จังหวัดเพชรบุรี... 1022
Physical and Chemical Characteristics of Pineapple Fruit (Smooth Cayenne) Product from First and Second Ratoons Pineapple in Rain-shadow Watershed Area, Phetchaburi Province
โดย สายสุจิตร พูลสงวน กิตติชัย ดวงมาลย์ และอลงกรณ์ อินทรักษา

3. ทส.11/O79 ประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ.....1030
The Efficiency and Economic Value the Substance Changes State Solar Collector
โดย สกุลรัตน์ คำมูล นริศรา ละอองเอก และสุพินดา จ้ำหนองโพธิ์

4. ทส.15/O91 การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุก ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา จังหวัดลำปาง..... 1038
Application of Geographic Information System for Risk Forest Area Encroachment Assessment, Mae Ngao on the Right Side National Reserved Forest, Lampang Province
โดย สุภาภรณ์ ผ่องศาลา

5. ทส.16/O107 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง..... 1046
Factors Effecting Community – based Adaptation on Thalay Noi Head Watershed Management, Kohtao Sub - district Paphayom District, Phatthalung Province
โดย กิติชัย รัตนะ
6. ทส.17/O135 การกำจัดพร้อมกันของธาตุอาหารในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินที่ปรับปรุงด้วยวิธีเคมี..... 1055
Simultaneous Removal of Nutrients from Synthetic Wastewater by Chemically-Treated Coal Fly Ash
โดย ทิพากร สีวอ และภัทรา เพ่งธรรมกีรติ
7. ทส.20/O146 การเปรียบเทียบผลของการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม *(Litopenaeus vannamei)* แบบผสมผสานในระบบปิดและแบบพัฒนาต่อคุณภาพน้ำ..... 1063
Comparative Study between Closed Polyculture System and Intensive Culture System on the Water Quality of Pacific White Shrimp *(Litopenaeus vannamei)*
โดย ทิพย์วิภา มีไชย ภาสิณี วรชนะนันท์ และพงศ์เชฏฐ์ พิชิตกุล
8. ทส.22/O191 การขยายพันธุ์และการเจริญเติบโตของผักบุ้งทะเลที่ปลูกคลุมดินบริเวณชายหาดชลาทัศน์..... 1073
Propagation and Growth of *Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br* for Cover Plants at Chalathat Beach
โดย ณิชา ประสงค์จันทร์ มุกดา สุขสวัสดิ์ และสมบูรณ์ ประสงค์จันทร์
9. ทส.23/O201 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณกับผลผลิตสับปะรดโรงงานโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม Landsat 8..... 1081
Study on Relation between Vegetation Index with Pineapple Production from Landsat 8
โดย บุษราวัลย์ ศรีเลิศวรกุล และปรีชา ธรรมานนท์

10. ทส.28/O251 การคัดแยกและจัดจำแนกแอคติโนแบคทีเรียจากดินชายหาดแม่รำพึง และศักยภาพการย่อยสลายทางชีวภาพของปิโตรเลียม ไฮโดรคาร์บอน..... 1089
Isolation and Identification of Actinobacteria from Mae Ramphueng Beach Soil and the Biodegradation Potential of Petroleum Hydrocarbon
โดย ธงชัย เฟาสันเทียะ นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์
11. ทส.29/O254 พฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติ…….. 1097
Behaviors toward Wildlife of National Park Visitors
โดย นภวรรณ ฐานะกาญจน์ พงษ์เขียว

ภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation)

1. ทส.1/P15 การบำบัดสีในน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา……..……...1107
Decolorization of Synthetic Dyeing Wastewater by Catalytic Ozonation
โดย ธัญวรรณ กฤษณะพุกต์ และชะลอ จารุสุทธิรักษ์
2. ทส.2/P19 การผลิตเอทานอลจากเศษอาหารด้วยเชื้อผสมของ *Bacillus subtilis* และ *Saccharomyces cerevisiae*……..…..1115
Ethanol Production from Food Waste by Co-culture of *Bacillus subtilis* and *Saccharomyces cerevisiae*
โดย พัชรา ต๊ะชาย อนวัช พินิจศักดิ์กุล พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์ และสุคนธ์ ตันติไพบูลย์วุฒิ
3. ทส.4/P51 ความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกตัวเต็มวัย และวัยอ่อนในพื้นที่เกษตรกรรม อำเภอสวนผึ้ง จ.ราชบุรี…….....1123
Species Diversity of Adult and Larva Amphibians in Agricultural Areas at Suan Phueng District Ratchaburi Province
โดย สุรภพ สุทธิวิเศษ กาญจนา ชินสำราญ และวุฒิ ทักษิณธรรม

4. ทส.5/P52 การศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแม่น้ำแม่กลอง
โดยใช้เทคนิค Fluorescence Spectroscopy..... 1131
Study of Characteristics of Dissolved Organic Matter in Mae Klong
Riverusing Fluorescence Spectroscopy
โดย มารุต สุขสมจิตร ไตรเทพ วิชย์โกวิทเทน
และกฤติฏิ์สุดา ภู่นาค
5. ทส.6/P63 น้ำหมักชีวภาพน้ำเค็มโดยแบคทีเรียทะเล..... 1139
Effective Microorganism Solution in Sea Water by Marine Bacterium
โดย พัฒนา ภูลเปี่ยม
6. ทส.24/P166 ประสิทธิภาพของระบบจุลินทรีย์ยึดเกาะโดยใช้เปลือกหอยนางรม
เป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียชุมชน..... 1146
Efficiency of Attached - Growth System Using Oyster Shell
as Media for Domestic Wastewater
โดย ปัณณวัฒน์ สุขประเสริฐ ภาคิณ วันชัยชนะ
เอกวิริยะ ชุมภู เอมอร ประจวบมอญ
และรตีวรรณ สุวัฒนมาลา
7. ทส.25/P174 บทบาทของพื้นที่สีเขียวบริเวณริมถนนกับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก..... 1154
The Role of Roadside Green Area and Fine Particulate Matter
โดย ศิรภัสร์ โคตรสีวงษ์ สุดารัตน์ ทรัพย์สินชัย
ศศิธร แม้นวิลัย รตีวรรณ สุวัฒนมาลา
และเอมอร ประจวบมอญ
8. ทส.26/P175 การบำบัดไอระเหยจากน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยตัวกรองชีวภาพจาก
เปลือกถั่วลิสง..... 1162
Fuel Vapors Removal Efficiency by Peanut Shell Biofilter
โดย จุฑามาศ ไชรัศมี พนม พรหมโสภา
สราลีวัลย์ ฤาชา รตีวรรณ สุวัฒนมาลา
และเอมอร ประจวบมอญ

สาขาวิทยาศาสตร์

Subject: Science

ภาคบรรยาย

Oral Presentation

Statistical Analysis of zero inflated negative binomial-beta exponential distribution

Chanakarn Jornsatian[1], Winai Bodhisuwan[1*] and Mena Patummasut[1]

ABSTARCT

A new mixed distribution called the zero inflated negative binomial-beta exponential (ZINB-BE) distribution is proposed and studied. That is a quite alternative distribution and more flexibility to analyze count data with overdispersion and excess zeros. Some statistical properties of the distribution are derived, such as mean and variance. Parameter estimation using maximum likelihood estimation is presented. Finally, the ZINB-BE distribution is applied to real data with numerous zeros, it is shown that the ZINB-BE distribution can be used as an alternative distribution of count data analysis.

Key words: excess zeros, zero inflated, overdispersion, count data

* Corresponding author; e-mail address: **fsciwnb@ku.ac.th**

[1]Department of Statistics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Count data analysis is a type of data in which the observations can take only the non-negative integer values in many disciplines including biology, ecology, agriculture, social science, econometric, medicine, public health, engineering and so on.

To model count data, the Poisson distribution can be fitted for count data which is the number of events occurring in a fixed interval of time or space. Especially, the assumption of this distribution implies equality of the mean and the variance, called equidispersion (Cameron and Trivedi, 1998). However, the Poisson distribution is not fit for count data because its variance is greater than its mean, resulting in overdispersion or the variance is less than the mean, resulting in underdispersion (Winklemann, 2000).

The negative binomial (NB) distribution has become increasingly popular as a more flexible than the Poisson distribution when fitting some the overdispersed data (Johnson *et al.*, 2005). The NB distribution is a mixing distribution of the Poisson and gamma distributions (Klugman *et al.*, 2012). However, the NB distribution is not suitable for count data sets in some applications, where large zeros count data that leads to heavy tail (Wang, 2011).

From overdispersion and heavy tail problems, if not properly modeled, the new distribution that introducing mixed NB distribution are developed such as the negative binomial exponential (NB-E) (Panjer and Willmot, 1981), negative binomial inverse Gaussian (NB-IG) (G´omez-D´eniz *et al.*, 2008).

In this sense, particularly under the overdispersion phenomena a new mixture distribution for more flexible alternative than the Poisson and NB distributions, namely the NB-beta exponential (NB-BE) distribution (Pudprommarat *et al.*, 2012) was proposed. It was obtained by mixing the NB distribution with a beta exponential (BE) distribution (Nadarajah and Kotz, 2006). As mention above, if overdispersion remains even after modeling which is a substantial proportion of the values are zero, the case in raw data is caused by the zero inflation.

One frequent manifestation of overdispersion is that the incidence of zero counts is greater than expected for the Poisson distribution and this is of interest because zero counts frequently have special status (Ridout *et al.*, 1998). Failure to properly account for the excess zeros constitutes a model misspecification that can result in biased or inconsistent estimators.

An alternative approach that accommodates the high frequency of zero counts, called the zero inflated (ZI) model. The model will be applied to describe some data sets because it provides better statistical fit. That is a mixture model that combines a count component and a point mass at zero. There are two sources of zeros causing the distinction of excess zero data, firstly, structural zeros, which are inevitable and sampling zeros, which occurred by chance (Ridout *et al.*, 1998).

Furthermore, many researchers have been proposed the mixture distribution of ZI models such as the zero inflated poisson (ZIP) (Lambert, 1992), zero inflated negative binomial (Greene, 1994), zero inflated Waring (ZIW) (Bodhisuwan, 2011), zero inflated negative binomial-generalized exponential (ZINB-GE) distributions (Aryuyuen *et al.*, 2014).

This paper is organized as follows: to investigate the new ZI distribution, ZINB-BE distribution. Especially, it is provided very useful for count data analysis with excess zeros. The properties such as mean and variance will be presented, including the graphs of the probability mass function (pmf). Finally, we include application to a real dataset.

MATERIALS AND METHODS

1. Zero inflated distribution

1.1 The ZI model

The ZI distribution can be in general from (Lambert, 1992):

$$P(X = x|\phi) = \phi\omega_0(x) + (1-\phi)f(x;\theta),$$

where x is a count variable,

ϕ is the probability of being an inflated zero,

$f(x;\theta)$ is the pmf of x with parameter θ ,

and this model in terms of Bernoulli distribution:

$$\omega_0(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x = 0 \\ 0 & \text{if } x = 1,2,3,\ldots \end{cases}$$

1.2 The ZINB-BE distribution

The ZINB-BE distribution is a mixture distribution of Bernoulli and NB-BE distributions (Pudprommarat *et al.*, 2012). We introduced the definitions and some properties of NB-BE and ZINB-BE distributions are given below:

Definition 1 Let X be a random variable of NB-BE distribution with the parameters r, a, b and c denoted as $X \sim \text{NB-BE}(r, a, b, c)$. The pmf of X is defined by

$$f(x) = \binom{r+x-1}{x} \sum_{j=0}^{x} \binom{x}{j} (-1)^j \frac{B(b + \frac{r+j}{c}, a)}{B(a,b)}, \quad x = 0,1,2,\ldots$$

for $r, a, b, c > 0$.

Definition 2 Let X be a random variable of ZINB-BE distribution with the parameters r, a, b, c and ϕ denoted as $X \sim \text{ZINB-BE}(r, a, b, c, \phi)$. The pmf of X is obtained as

$$g(x) = \begin{cases} \phi + (1-\phi)\dfrac{B(b+\frac{r}{c}, a)}{B(a,b)} & \text{if } x = 0 \\ (1-\phi)\binom{r+x-1}{x}\displaystyle\sum_{j=0}^{x}\binom{x}{j}(-1)^j\dfrac{B(b+\frac{r}{c}, a)}{B(a,b)} & \text{if } x = 1, 2, 3, \ldots \end{cases}$$

where $0 < \phi < 1$ and $r, a, b, c > 0$.

The graphs of ZINB-BE distribution with specified parameters r, a, b, c and ϕ, offered in Figure 1.

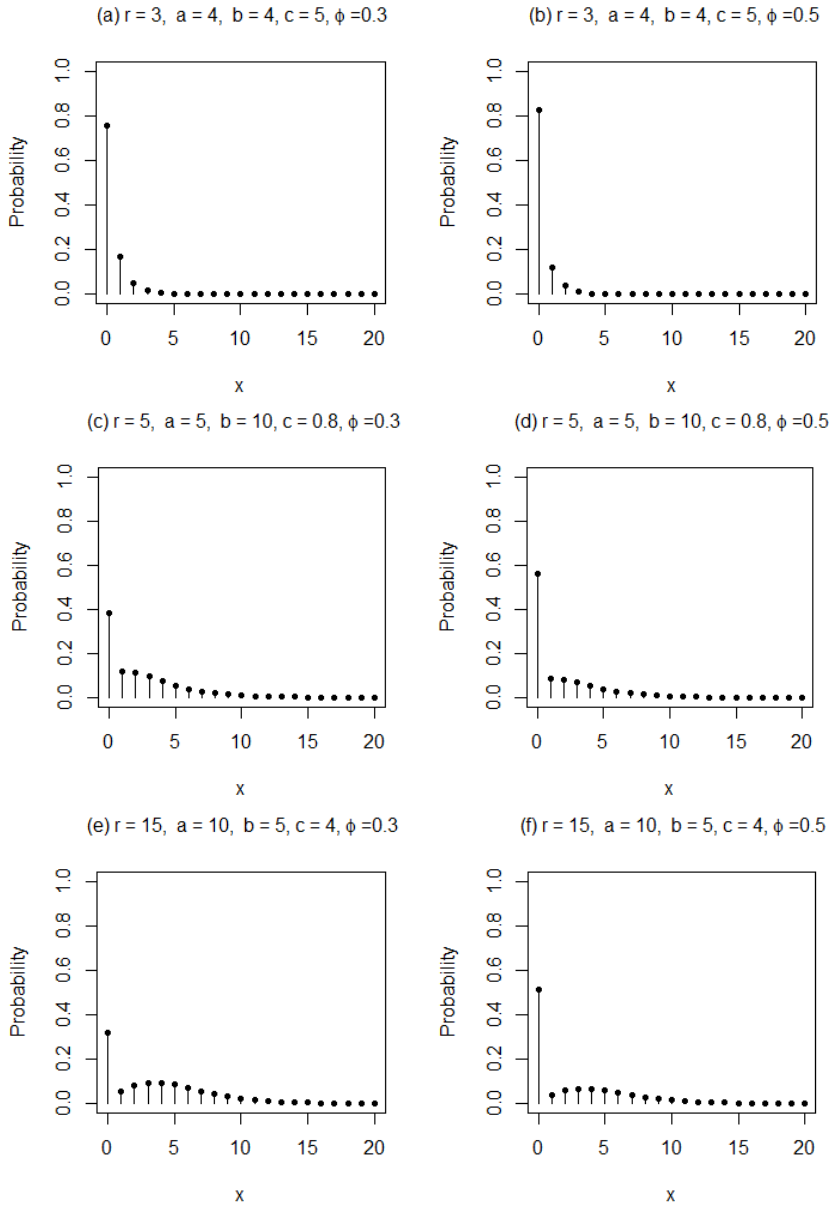


Figure 1 The pmf of ZINB-BE distribution with specified parameter values.

Theorem 1 Let $X \sim \text{ZINB-BE}(r, a, b, c, \phi)$ then the mean and the variance of X are expressed as

$$E(X) = (1-\phi)\frac{[rB(b-\frac{1}{c}, a) - rB(a,b)]}{B(a,b)}, \text{ when } b > \frac{1}{c},$$

$$E(X^2) = (1-\phi)\frac{[(r^2+r)B(b-\frac{2}{c}, a) - (2r^2+r)B(b-\frac{1}{c}, a) + r^2B(a,b)]}{B(a,b)}, \text{ when } b > \frac{2}{c},$$

$$Var(X) = E(X^2) - [E(X)]^2.$$

Then,

$$Var(X) = (1-\phi)\frac{[(r^2+r)B(b-\frac{2}{c}, a) - (2r^2+r)B(b-\frac{1}{c}, a) + r^2B(a,b)]}{B(a,b)}$$

$$-\Big[\frac{(1-\phi)}{B(a,b)}[rB(b-\frac{1}{c}, a) - rB(a,b)]\Big]^2, \text{ when } b > \frac{2}{c}.$$

2. Parameter estimation

We apply maximum likelihood estimation (MLE) to estimate parameter which is the most frequently used due to the good properties of the estimates: the properties of being consistent, asymptotically normal and having minimum variance for large samples (White and Eberhardt, 1980).

The parameter estimation of ZINB-BE distribution using MLE procedure is provided. The likelihood function of $\text{ZINB-BE}(r, a, b, c, \phi)$ is given by

$$L(r, a, b, c, \phi) = \prod_{i=1}^{n}\Big[I_{(x_i=0)}(\phi + (1-\phi)\frac{B(b+\frac{r+j}{c}, a)}{B(a,b)}) +$$

$$I_{(x_i>0)}(1-\phi)\binom{r+x_i-1}{x_i}\sum_{j=0}^{x_i}\binom{x_i}{j}(-1)^j\frac{B(b+\frac{r+j}{c}, a)}{B(a,b)}\Big].$$

Then, the log-likelihood of the $\text{ZINB-BE}(r, a, b, c, \phi)$ is $\mathscr{L} = logL(r, a, b, c, \phi)$.

By differentiating the log-likelihood function of ZINB-BE distribution, partial derivatives of the log likelihood function with respect to r, a, b, c, ϕ.

However, the MLE estimators do not exist in closed form, we numerically optimized the log-likelihood function to obtain parameter estimates by using **optim** function in **stats** of R package (R Core Team, 2015).

RESULTS AND DISCUSSION

To illustrate this procedure, we use as an example data collected on the fetal lambs movement data (Leroux and Puterman, 1992; Angers and Biswas, 2003). Here the number of movements from 0 to 7 has the frequency 182, 41, 12, 2, 2, 0, 0, 1. The data was collected in a study of breathing and body movements in fetal lambs designed to examine the possible changes in the amount of fetal activity during the last two-thirds of the gestation period. The number of movements by a fetal lamb as observed by ultrasound, were recorded.

Table 1 Estimate parameters among ZIP, ZINB and ZINB-BE distributions.

		Expected value by fitting distribution		
Number of movement	Observed value	ZIP	ZINB	ZINB-BE
0	182	182.00	182.60	182.31
1	41	36.86	38.97	40.44
2	12	15.61	12.03	11.12
3	2	4.41	4.09	3.65
4	2	0.93	1.46	1.37
5	0	0.16	0.53	0.57
6	0	0.02	0.20	0.26
7	1	0.00	0.07	0.13
Parameter estimates		$\hat{\phi} = 0.5771$ $\hat{\lambda} = 0.8473$	$\hat{\phi} = 0.0028$ $\hat{r} = 0.5311$ $\hat{p} = 0.5967$	$\hat{\phi} = 0.0029$ $\hat{r} = 1.4678$ $\hat{a} = 1.6799$ $\hat{b} = 1.9357$ $\hat{c} = 3.7139$
log-likelihood		190.44	186.63	186.17
Anderson Darling test statistic		0.142	0.03	0.009
p-value		0.7861	0.9752	0.9971

For fitting distribution, we use the Anderson Darling (AD) test statistic for goodness of fit test. From the result in Table 1, we find log-likelihood and AD test statistic of the ZINB-BE distribution is the smallest values compared to the other distributions. Also, based on *p*-value of AD test statistic, it is found that the ZINB-BE distribution provided a significantly better fit than ZIP and ZINB distributions for this data set.

Figure 2 shows that the data of fetal lambs movement and the expected value of ZINB-BE distribution are very closed. Thus, the ZINB-BE is an alternative distribution for fitting data which excess zeros.

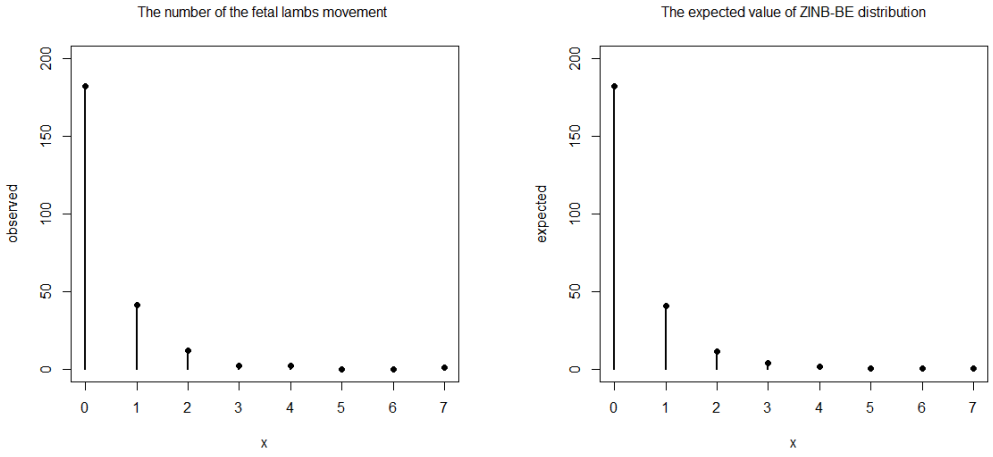


Figure 2 The observed data and the expected value of ZINB-BE distribution.

CONCLUSION

This work presents the new zero inflated distribution, namely the ZINB-BE distribution. In particular, the probabilistic properties are presented and the MLE approach is discussed. The usefulness of the proposed distribution is illustrated by analysis of a real data. Based on the results, the proposed distribution is the best fit, when compare to the ZIP and ZINB distributions based on with p-value of AD test statistic for count data with excess zeros. In this work, the ZINB-BE distribution is a flexible alternative distribution.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the Department of Statistics, Faculty of Science, Kasetsart University. The first author would like to thank the Science Achievement Scholarship of Thailand (SAST) for financial support.

REFERENCES

Angers, J.F., and A. Biswas. 2003. A Bayesian analysis of zero-inflated generalized Poisson model. **Computational statistics & data analysis**. 42(1): 37-46.

Aryuyuen, S., W. Bodhisuwan and T. Supapakorn. 2014. Zero inflated negative binomial-generalized exponential distribution and its applications. **Songklanakarin Journal of Science & Technology**. 36(4).

Bodhisuwan, W. 2011. Zero inflated Waring distribution and its application. *In* **The 37th Congress on Science and Technology of Thailand**. Department of Statistics, Kasetsart University, Thailand.

Cameron, A.C. and P.K. Trivedi. 1998. **Regression Analysis of Count Data**. Cambridge University Press. 1st edn.

G´omez-D´eniz, E., J.M. Sarabia and E. Calderin-Ojeda. 2008. Univariate and multivariate versions of the negative binomial - inverse Gaussian distributions with applications. **Insurance: Mathematics and Economics**. 42(1): 39–49.

Greene, W.H. 1994. Accounting for excess zeros and sample selection in Poisson and negative binomial regression models. **Working Paper EC-94-10, Department of Economics, New York University**.

Johnson, N., A. Kemp and S. Kotz. 2005. **Univariate Discrete Distributions**. John Wiley & Sons, New York. 3rd edn.

Klugman, S., H. Panjer and G. Willmot. 2012. **Loss models: from data to decisions**. Wiley Inter Science. 3rd edn.

Lambert, D. 1992. Zero - inflated Poisson regression with application to defects in manufacturing. **Technometrics**. 34(1): 1–14.

Leroux, B.G., and M.L. Puterman. 1992. Maximum-penalized-likelihood estimation for independent and Markov-dependent mixture models. **Biometrics.** 48: 545-558.

Nadarajah, S. and S. Kotz. 2006. The beta exponential distribution. **Reliability engineering & system safety**. 91(6): 689–697.

Panjer, H.H. and G.E. Willmot. 1981. Finite sum evaluation of the negative binomial-exponential model. **Astin Bulletin**. 12(02): 133–137.

Pudprommarat, C., W. Bodhisuwan and P. Zeephongsekul. 2012. A new mixed negative binomial distribution. **Journal Applied Sciences**. 12(17): 1853–1858.

R Core Team. 2015. **R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing**. Vienna, Austria.

Ridout, M., C.G. Dem´etrio and J. Hinde. 1998. Models for count data with many zeros. *In* **Proceedings of the XIXth international biometric conference**. 19: 179–192.

Wang, Z. 2011. One mixed negative binomial distribution with application. **Journal of Statistical Planning and Inference**. 141(3): 1153–1160.

Winkelmann, R. 2000. **Econometric Analysis of Count Data**. Springer-Verlag, Berlin. 3rd edn.

White, G.C., and L.E. Eberhardt. 1980. Statistical analysis of deer and elk pellet-group data. **Journal of Wildlife Management.** 121-131.

การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งาน

Removal of Cadmium from the Synthetic Wastewater by Spent Cationic Resin

อานนท์ จริยนรเศรษฐ์[1] รุจา สุวรรณสุข[1] วชิระ พิมพ์ปราโมทย์[1] กรองแก้ว ทิพยศักดิ์[1*] และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช[2]

Anon Jariyanorasade[1] Rujar Suwannasook[1] Wachira Pimpramote[1] Krongkaew Tippayasak[1*] and Pantawat Sampanpanish[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเรซินประจุบวก Lewatit MonoPlus S108 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Spent Resin, SR) ซึ่งเป็นเรซินชนิดกรดแก่ โดยทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และค่าพีเอช ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) 10 mg/L จากแคดเมียมคลอไรด์ จำนวน 25 mL โดยแปรค่าน้ำหนักของ SR 1, 3 และ 5 กรัม ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม พบว่าที่สภาวะการบำบัด Cd^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ ใช้เวลา 10 นาที สามารถเข้าสู่สมดุล พีเอชที่ศึกษาคือ 2, 4, 6 และ 5.44 (พีเอชเดิมของน้ำเสียสังเคราะห์) ผลการศึกษา พบว่าที่ พีเอช 5.44 สามารถบำบัดแคดเมียมได้สูงสุดมากกว่า 99% ไอโซเทอร์มของการบำบัด Cd^{2+} เมื่อแปรค่าน้ำหนักของ SR จาก 0.1 ถึง 5 กรัม พบว่าไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น และแบบฟรุนลิชด์ มีความสอดคล้องกัน เมื่อใช้น้ำกลั่น และกรดไฮโดรคลอริก 5 %โดยน้ำหนัก เป็นตัวชะละลาย Cd^{2+} จากเรซินที่ใช้บำบัด พบว่ากรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวชะละลายที่ดี ได้ Cd^{2+} ออกมา 94.8 % ดังนั้น SR สามารถนำกลับมาบำบัดแคดเมียมซ้ำได้อีก

ABSTRACT

The aim of this research was to study the removal of Cadmium (Cd (II)) in synthetic wastewater by spent cationic resin - SR -, Lewatit MonoPlus S108, a strong acid exchange resin. The experiments were carried by batch experiment. Factors affecting the Cd (II) removal were SR quantities and pH value. The initial Cd (II) concentration was 10 mg/L 25 mL and SR was varied 1, 3 and 5 g. The results showed that the optimum time for treatment was 10 minute to reach equilibrium, at original pH of synthetic wastewater at 5.44, it could remove more than 99 % of Cd (II). Both the linear and Freundlich adsorption isotherm for Cd (II) varied UR weight 0.1-5 g, the data were fitted with the isotherm. The desorption experiment by the de-ionized water and the 5% v/v of HCl were examined. HCl showed as the best eluent and Cd^{2+} has 94.8 % desorption. Consequently, SR can be reusable for cadmium removal.

Keywords: Cadmium, Spent cation exchange resin, Cadmium Removal isotherm

*Corresponding author; e-mail address: **ktkrongk@kmitl.ac.th**

[1]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

[2]สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[2]Environmental Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการระบายน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติมีสารปนเปื้อนต่างๆ จำนวนมาก ระบบนิเวศแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลง และขาดความอุดมสมบูรณ์ สาเหตุหลักเกิดจากภาคอุตสาหกรรม ที่มีการปล่อยน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานลงสู่แหล่งน้ำในรูปแบบของน้ำทิ้งเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งประเทศไทยมีความเจริญก้าวหน้าในด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น ทำให้กระบวนการผลิตของบางอุตสาหกรรม จำเป็นต้องใช้วัตถุดิบหลากหลายในกระบวนการผลิต และปล่อยของเสียออกมา ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี ที่ต้องใช้โลหะหนักร่วมในกระบวนการผลิต เป็นต้น เมื่อโลหะหนักจากกระบวนการผลิตปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ หรือไม่มีการกำจัดก่อน จะส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพแหล่งน้ำ โดยโลหะที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำที่พบส่วนมากได้แก่ สารหนู แคดเมียม สังกะสี โครเมียม นิกเกิล และแมงกานีส เป็นต้น ซึ่งโลหะหนักมีบทบาทต่อการเกิดมลพิษทางน้ำมากที่สุด โดยเฉพาะแคดเมียมที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต ของภาคอุตสาหกรรม ส่งผลให้เกิดการตกค้าง และ ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ตลอดจนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร หากสารแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจากอาหารที่บริโภคเป็นหลัก จะทำให้ร่างกายได้รับพิษของแคดเมียม แบบเฉียบพลันเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร และระบบทางเดินหายใจ และความเป็นพิษแบบเรื้อรังเป็นพิษต่ออวัยวะภายในร่างกาย รวมถึงระบบไหลเวียนเลือด จากความเป็นพิษของแคดเมียมดังกล่าว จึงต้องมีการบำบัด แคดเมียมให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการเลือกเรซินประจุบวกที่ผ่านการใช้งาน (Spent Cationic Resin, Lewatit MonoPlus S108) มากำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดไอโซเทอร์มที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เรซินที่ผ่านการใช้งานเมื่อไม่มีความคุ้มค่าในการนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้กลายเป็นของเสีย ต้องนำไปทิ้ง หรือกำจัดด้วยวิธีต่างๆ เมื่อจำนวนเรซินมีมากขึ้น ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ดังนั้นการนำเรซินดังกล่าวมาใช้งาน เป็นการนำของเสียนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยวิธีการที่เลือกใช้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออน หรือการแลกเปลี่ยนประจุบนของแข็ง เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับการพิจารณา และถูกเลือกมาใช้ในการแยกสารจำพวกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งโรงงาน และเป็นการป้องกันมลพิษสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพแสดงใน Figure 1

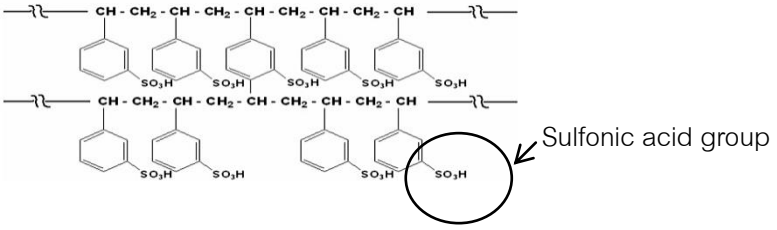


Figure 1 Structure of ion exchange resin

ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างเรซินที่ใช้งานแล้วกับแคดเมียม เป็นดังนี้

$$2R\text{-}Na + Cd^{2+} \leftrightarrows R\text{-}Cd + 2Na^{+} \quad \text{..... (1)}$$

หรือ

$$R\text{-}Na + M^{n+} \overset{K}{\leftrightarrows} R\text{-}M + Na^{+} \quad \text{..... (2)}$$

อุปกรณ์และวิธีการ

นำเรซินจากโรงงาน (Raw Material, RM) กับเรซินที่ผ่านการใช้ (Spent Resin Lewatit MonoPlus S108, SR) ที่เก็บแบบแช่น้ำไว้ มาศึกษาสมบัติทางเคมีโดยใช้พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ใช้อัตราส่วน 1:1 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) ใช้อัตราส่วน 1:5 ค่าของแข็งที่ละลายน้ำ (Total Dissolved Solid) และค่าความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) ด้วยวิธีแอมโมเนียมอะซิเทต (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) วิธีการดำเนินการวิจัยแสดงใน Figure 2 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ต่อไปนี้

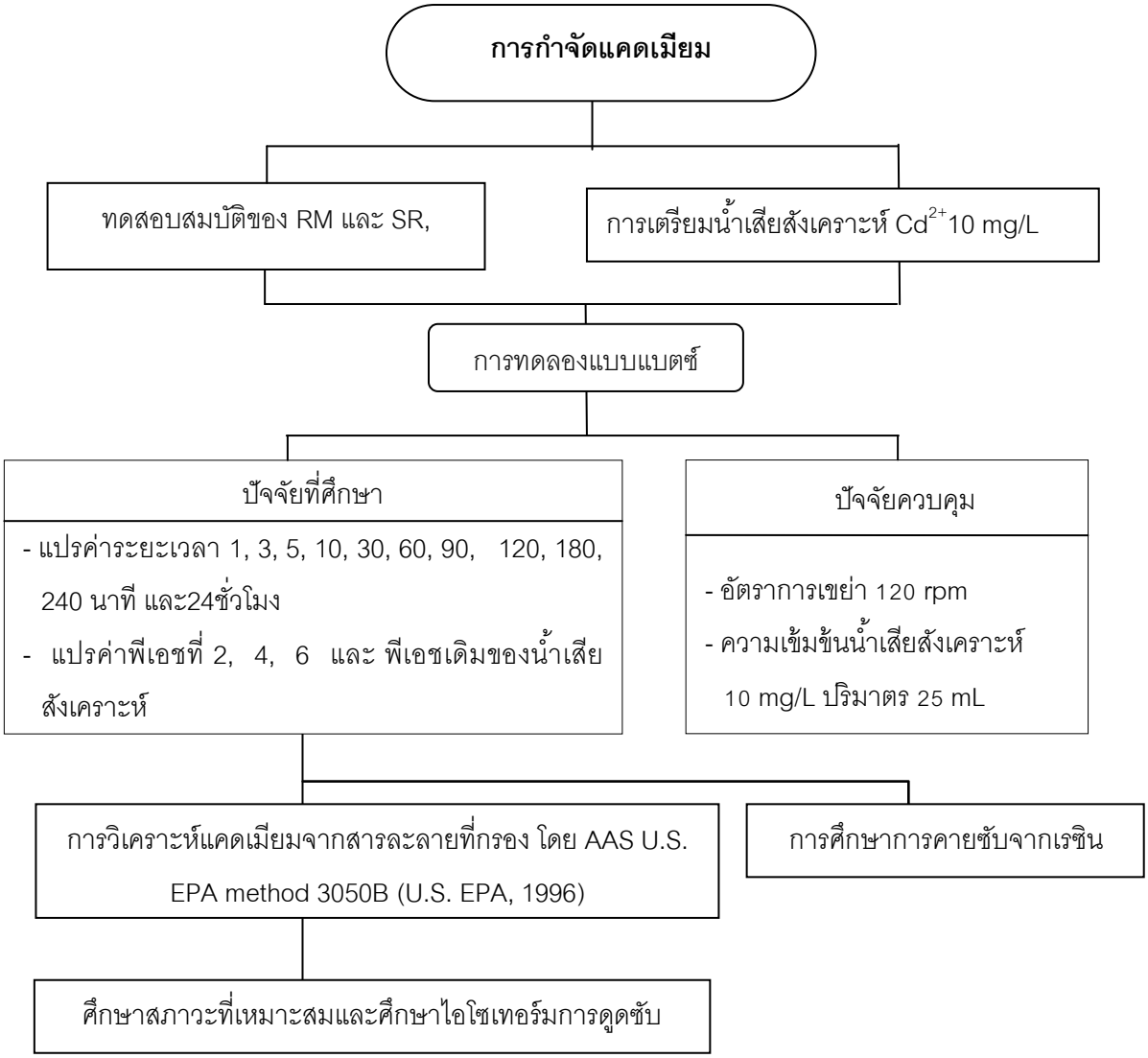


Figure 2

ผลการทดลองและวิจารณ์

สมบัติทั่วไปของเรซิน

เรซินที่ใช้ในการศึกษาเป็นเรซินชนิดกรดแก่ ยี่ห้อ Lewatit MonoPlus S108 ที่ไม่ผ่านการใช้งาน (Raw Material, RM) กับ เรซินที่ผ่านการใช้งาน (Spent Resin, SR) ทั้ง 2 ชนิดเก็บรักษาด้วยการนำเรซินแช่น้ำก่อนนำมาศึกษา เรซินที่ผ่านการใช้งานนั้นมีเปอร์เซ็นต์การอุ้มน้ำมากกว่าเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน เพราะเรซินได้ผ่าน การใช้งาน ทำให้บริเวณพื้นผิวของเรซินนั้นอาจจะแตก หรือมีพื้นที่ว่าง ทำให้น้ำแทรกตัวเข้าไปตามพื้นที่ว่างของเรซินได้ ค่าพีเอชเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งานมีค่า 8.62 เมื่อวัดค่าของแข็งละลายน้ำพร้อมกับค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูง เนื่องจากไอออนของเรซินอยู่ในรูป Na^+ความจุแลกเปลี่ยนประจุบวกของเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน และเรซินที่ผ่านการใช้งาน เป็น 0.011±0.9 และ0.12±0.05 cmol/g ตามลำดับ และปริมาณแคลเซียมของเรซินที่ไม่ผ่านการใช้งาน และเรซินที่ผ่านการใช้งาน เป็น 0.045±0.03 และ2.177±0.58 meq/g

ผลของค่าปริมาณเรซินต่อการบำบัด

จากการศึกษาเพื่อหาปริมาณเรซินที่เหมาะสมในการบำบัด ทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นโดยประมาณ 10 mg/L ปริมาตร 25 mL โดยแปรค่าปริมาณเรซินเป็น 1, 3 และ5 กรัม ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 rpm จาก Figure 3 เห็นได้ว่าค่าการกำจัดแคดเมียมในช่วง 5 นาทีแรก เกิดการดูดซับทางเคมี อย่างรวดเร็ว ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นที่ตำแหน่งซัลโฟเนต ($-SO_3Na$) ในสายโซ่ของเรซินสามารถเกิดพันธะกับไอออนแคดเมียม แต่เมื่อหลังจาก 5 นาทีไปแล้ว พื้นที่ผิวของการดูดซับจะน้อยลง ทำให้การดูดซับจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ และจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 10 นาที ดังนั้นระยะเวลาในการบำบัดที่เหมาะสมคือ 10 นาที ซึ่งปริมาณแคดเมียมที่หลงเหลืออยู่จะเท่ากับ 0.05, 0.07 และ0.05 mg/L และเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 99.51 % ± 0.062, 99.39 % ± 0.01 และ 99.50 % ± 0.035 สำหรับปริมาณเรซิน 1 g 3 g และ 5 g ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณแคดเมียมที่หลงเหลืออยู่นั้น ไม่ผ่านค่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษซึ่งกำหนดค่าไว้ 0.03 mg/L จำเป็นต้องมีการบำบัดซ้ำในรอบที่ 2 ต่อไป

ผลของค่าพีเอชต่อการบำบัด

จากการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัด ทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นโดยประมาณ 10 mg/L ปริมาตร 25 mL ที่พีเอช 2, 4, 6 และพีเอชเดิม เนื่องจากต้องการศึกษาช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการทดลอง และที่พีเอชตั้งแต่ 8.65 ขึ้นไปพบว่าแคดเมียมเริ่มตกตะกอนเป็น $Cd(OH)_2$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้ศึกษาการแปรค่าพีเอชที่สูงกว่า 8.65 เพราะอาจเกิดการตกตะกอนของ $Cd(OH)_2$ ควบคู่กับการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งการทดลองนี้ใช้ปริมาณเรซิน 1 g ทำการเขย่า ที่ความเร็วรอบ 120 rpm เป็นเวลา 10 นาที โดยอุณหภูมิระหว่างการทดลองอยู่ที่ 30 ± 2 °C แล้ววิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียม กับค่าพีเอชที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดลองแสดงใน Figure 4

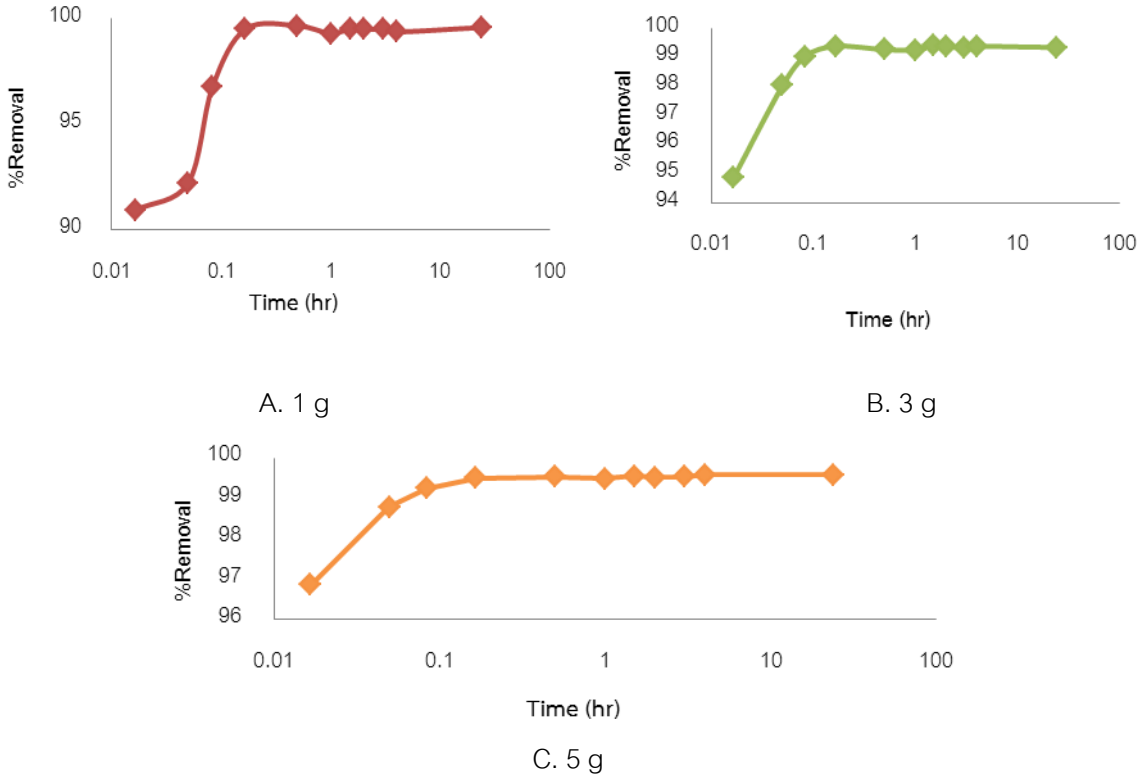


Figure 3 Removal of cadmium by spent cationic resin with the various periods

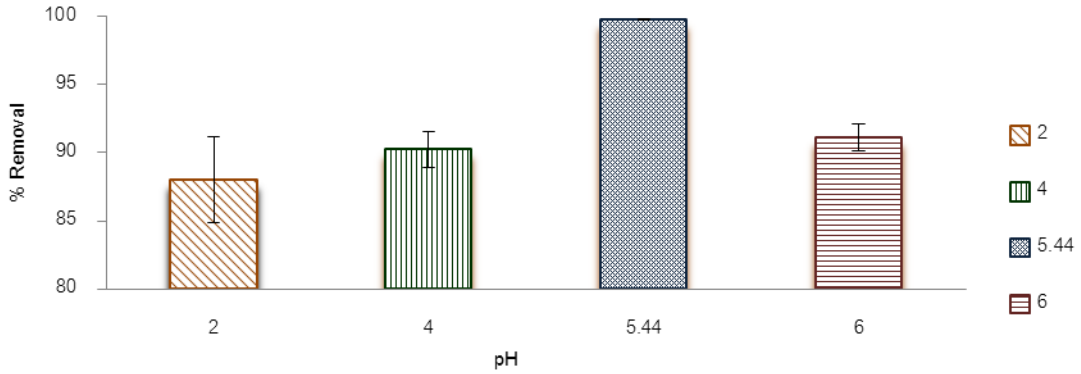


Figure 4 Effect of pH on cadmium removal

ค่าพีเอชมีผลต่อการกำจัดแคดเมียมโดยการบำบัดด้วยเรซิน พบว่า เมื่อค่าพีเอชลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมมีแนวโน้มที่ต่ำลง สำหรับการทดลองนี้ ค่าพีเอชที่มีการบำบัดแคดเมียมได้ดีที่สุดคือ ที่พีเอช 5.44 หรือ พีเอชเดิม ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 99.82 % ± 0.03 ส่วนที่ความเป็นกรดสูง (pH ต่ำ) จะมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ต่ำกว่าซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของนักวิจัย (วรรณา และคณะ, 2555) ดังนั้นการเพิ่มความเป็นกรดให้กับสารละลาย เป็นการเพิ่มความเข้มข้น H^+ ให้มากขึ้น ซึ่ง H^+ เป็นคู่แข่งกับ Cd^{2+} ในการเข้าแลกเปลี่ยนประจุบวกในเรซิน กับหมู่ซัลโฟเนต ($-SO_3Na$) เป็นผลทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดลดลงเมื่อพีเอชมีค่าลดลง และอีกสาเหตุหนึ่งคือ การที่เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วจากโรงงานมีโอกาสเก็บปนกับเรซินชนิดประจุลบทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดลดลงได้เช่นกัน

ไอโซเทอร์มของการบำบัดแคดเมียม

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการบำบัด ซึ่งผลจาการวิเคราะห์สรุปได้ดัง Table 1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าข้อมูลการบำบัดแคดเมียม โดยเรซินที่ผ่านการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบ ไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่า ไอโซเทอร์มแบบเชิงเส้น มีค่าคงที่ของการดูดซับ (K_d) เท่ากับ 1.2764 และไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) เท่ากับ 1.1060 mg/g ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akissi, L.C., *et.al.* (2013) ศึกษาการทดลองแบบแบตช์ และแบบคอลัมน์ ในการกำจัดแคดเมียมในสารละลาย โดยใช้ขี้เลื่อยจาก Triplochiton scleroxylon ที่ไม่มีการดัดแปลง ซึ่งความสามารถในการดูดซับสูงสุดได้จาก ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ คือ 10.793, 10.476, 10.529 และ10.061 mg/g ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 °C ตามลำดับ แต่ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเรซินมีค่าต่ำกว่าขี้เลื่อย

ไอโซเทอร์มทั้ง 3 แบบ พบว่า ไอโซเทอร์มการบำบัดแบบเชิงเส้น มีค่า R^2 มากกว่าแบบแลงเมียร์ และแบบฟลุนด์ลิช แสดงให้เห็นว่าการดูดซับบนผิวเรซินมีอยู่อย่างไม่มีขีดจำกัด ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของเรซินแปรผันตรงกับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล ไอโซเทอร์มลักษณะนี้ใช้อธิบายสมดุลการดูดซับได้ดีกับตัวถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยมีค่าคงที่การดูดซับ คือ K_d เท่ากับ 1.2764 ซึ่งค่า K_d ที่มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าการแลกเปลี่ยนประจุใดๆ (M^{n+}) กับ Cd^{2+} บนหมู่ฟังก์ชันของ SR มีแนวโน้มที่จะเป็นผลิตภัณฑ์มากกว่าที่จะกลับมาเป็นสารตั้งต้น สามารถอธิบายได้ทั้งสองแบบคือ การดูดซับนั้นสามารถเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิว ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของเรซินแปรผันตรงกับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล และยังสามารถเกิดขึ้นในลักษณะเรียงซ้อนกันหลายชั้น และเกิดชั้นของประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electrical double layer) ซึ่งก่อนที่นำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมาดูดซับแคดเมียม เรซินจะอิ่มตัวไปด้วย Na^+ และเมื่อไปดูดซับแคดเมียมในสารละลายจะเกิดการแลกเปลี่ยนโดยทั่วไปของโครงสร้างเรซินบางส่วนจะถูกแทนที่ด้วย Cd^{2+} การแทนที่เช่นนี้ทำให้เกิดประจุลบที่พื้นผิว ซึ่งจะเป็นกลางได้ โดยการดูดซับประจุบวก จึงมีผลทำให้เกิดชั้นประจุไฟฟ้าสองชั้น แต่อาจจะเกิดแบบฟลุนด์ลิชในปริมาณที่มากกว่า

Table 1 Effect of spent cationic resin quantities on isotherm

Spent cationic resin			
	Linear	Langmuir	Freundlich
Equation	$Q = 1.2764C_e + 0.6668$	$1/Q = 0.0633 (1/C) + 0.9042$	$\log Q = 0.4747 \log C_e + 0.3255$
R^2	0.7842	0.2191	0.6113
Adsorption constant	$K_d = 1.2764$	b = 14.2844	1/n = 0.4747
		$Q_m = 1.1060$ mg/g	K = 2.1159

การคายซับ

หลังการบำบัดแคดเมียมด้วยเรซินทำให้แคดเมียมยึดเกาะที่หมู่ฟังก์ชันของเรซิน สามารถทำให้เกิดย้อนกลับหรือคายกลับคืนออกมาสู่สารละลายได้ต้องเลือกสารชะที่เหมาะสม ในงานนี้เลือกใช้น้ำ และกรดไฮโดรคลอริคเป็นตัวชะให้เกิดการคายซับ ซึ่งผลจาการวิเคราะห์สรุปได้ดัง Table 2 พบว่าการชะด้วยน้ำกลั่น ทำให้เรซิน

คายปริมาณแคดเมียมออกมาประมาณ 0.0003 – 0.0006mg และค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืน 0.35 -0.91 % ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับไว้ในตอนเริ่มต้น 0.1 g เนื่องจากเรซินมีการดูดซับทางเคมี ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง โดยน้ำเป็นตัวชะที่สามารถเข้าแทนที่กับแคดเมียมในสายโซ่เรซินได้ไม่ดี จึงทำให้น้ำชะปริมาณแคดเมียมออกมาได้ปริมาณน้อยมากจึงไม่เหมาะกับเป็นสารรีเจนเนอเรต เมื่อเทียบกับกรดไฮโดรคลอริคได้แคดเมียมคายซับมาเฉลี่ย 59.68 ± 6.97% (n=3) เมื่อทำสมดุลมวลสารปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่กลับคืน 94.81±13.49% แสดงถึงกรดไฮโดรคลอริก 5%v/v ที่ใช้เป็นสารรีเจนเนอเรต สามารถชะแคดเมียมที่อยู่ในสายโซ่เรซินได้ดีกว่าน้ำ เนื่องจากความสามารถในการเข้าแทนที่ของ H^+ จะดีกว่าน้ำ จึงทำให้แคดเมียมหลุดออกจากสายโซ่เรซินได้ง่ายกรดไฮโดรคลอริกสามารถเป็นสารรีเจนเนอเรตได้ และนำเรซินกลับมาใช้บำบัดแคดเมียมใหม่ได้อีกครั้งแต่ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง

Table 2 Effect of hydrochloric acid 5%v/v on desorption

No.	Spent cationic resin quantities (mg/g)				Mass balance		
	Adsorption	Desorption	Adhesion	% Recovery	Initial concentration (mg)	Total concentration (mg)	% Quality assurance
1	0.093	0.061	0.031	65.59	0.093	0.092	98.81
2	0.100	0.052	0.028	52.00	0.100	0.080	79.77
3	0.096	0.059	0.043	61.46	0.096	0.102	105.85
Avg.	0.096	0.057	0.034	59.68	0.096	0.091	94.81
SD	0.004	0.005	0.01	6.97	0.004	0.01	13.49

สรุป

เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว สามารถนำมาใช้ในการบำบัดแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 mg/L ถึงสมดุลได้รวดเร็วภายใน 10 นาที ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมด้วยเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Lewatit MonoPlus S108) คือ 5.44 ของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นที่ไม่ปรับค่าพีเอช สามารถกำจัดปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีที่สุด มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ 99 % ประมาณความสามารถในการบำบัดได้สูงสุดถึง 1.1060 mg/g ของเรซิน จากสมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์ และเรซินยังสามารถนำมารีเจนเนอเรตกลับมาใช้ใหม่ได้โดยใช้กรดไฮโดรคลอริค 5%(v/v) เป็นวิธีที่ดีในการลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียที่มีแคดเมียมได้ ค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียอันตรายจะลดลง เพราะปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์จะลดลง และค่าใช้จ่ายในการบำบัดจะมีค่าลดลงตาม เนื่องจากไม่ได้ใช้สารเคมีอื่นมากในการบำบัดน้ำเสีย และเรซินที่ใช้งานแล้วถือว่าเป็นของเสียที่ไม่มีต้นทุน หรือ ต้นทุนต่ำ ดังนั้นการนำเรซินที่ใช้งานแล้วมาบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมสามารถเปลี่ยนจากของเสีย มาเป็นประโยชน์ได้ (Waste Utilization)

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. **มาตรฐานคุณภาพน้ำ**. [Online]. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2556). Available : http://www.pcd.go.th.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. **คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่มที่ 1**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

พอตา ประสานนาม. 2547. **การกำจัดโลหะออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตจาก Hydroxy ethyl Cellulose**. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการ และวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2547.

วรรณา สายแก้ว และคณะ. “การดูดซับแคดเมียมไอออนด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร” ราชภัฏเพชรบูรณ์สาร. ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, 2555. หน้า 1-10.

Akissi, L.C.K., Adouby, K., Yao, B. and Boa, D. 2013. Batch and column studies for Cadmium (II) removal using sawdust from Triplochiton Scleroxylon. **International Journal of Engineering Science and Technology**. 5(1), 31-40.

Bulut, Y. and Tez, Z. 2006. Removal of heavy metals from aqueous solution by sawdust adsorption. **Journal of Environmental Sciences**. 19(2), 160-166.

Fei, W., Lian-jun, W., Jain-sheng, L., Xiu-yun, S. and Wei-qing, H. 2008. Adsorption behavior and mechanism of cadmium on strong-acid cation exchange resin. Trans. **Nonferrous Met. Soc. China**. 19, 740-744.

On the Truncated Beta-Pareto Distribution

Atchariya Watthanawisut[1], Winai Bodhisuwan[1*] and Mena Patummasut[1]

ABSTRACT

In this work, we introduce a new truncated distribution, namely, the truncated beta-Pareto distribution. Some probability functions are presented, e.g., the probability density function and the cumulative distribution function. A model parameters estimation using maximum likelihood estimation is discussed. Finally, we apply the truncated beta-Pareto distribution to fit two real datasets, and the goodness of fit test based on the Kolmogorov-Smirnov statistic are presented. We also compare the performance of goodness of fit to the beta-Pareto distribution. As a result, it is shown that the truncated beta-Pareto distribution is better than the fit-based distribution on both real datasets.

Key words: Pareto, beta-Pareto, truncated beta-Pareto distribution

* Corresponding author; e-mail address: **fsciwnb@ku.ac.th**

[1]Department of Statistics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

The Pareto distribution has a long tailed with a shape parameter k and location parameter θ, which is the minimum value of the random variable Y, the probability density function (pdf) (Johnson *et al*., 1994) is

$$p(y) = \frac{k\theta^k}{y^{k+1}}, \;\; \theta > 0; \;\; k > 0; \;\; y \geq \theta.$$

The Pareto distribution plays an important role in real life applications, because many datasets are observed to follow a power law probability tail. Examples of such applications include: size of city populations, earthquakes, moon craters, solar flares, computer files, and occurrence of wars (Newman, 2005).

In many applications, it is natural to consider an upper bound that truncates the tail. The truncated Pareto distribution has a wide range of application in many fields for data analysis, for instance on earthquake magnitudes, forest fire areas, fault lengths, oil and gas field sizes (Aban *et al*., 2006), and on astrophysical data, namely, the mass of stars and the radius of asteroids (Zaninetti and Ferraro, 2008).

The beta-Pareto distribution was introduced by Akinsete *et al*. (2008). It is a unimodal that was reduced to some existing distributions, which are known, and was applied to flood data. Furthermore, this study is able to explore the applications of this distribution in other situations, when heavy and long tail distribution have been used.

If X is a beta-Pareto with random variables α, β, θ, k, its pdf is

$$g(x) = \begin{cases} \dfrac{k}{\theta B(\alpha,\beta)} \left[1 - \left(\dfrac{x}{\theta}\right)^{-k}\right]^{\alpha-1} \left(\dfrac{x}{\theta}\right)^{-k\beta-1}, & \text{if } x \geq \theta; \;\; \alpha,\, \beta,\, k > 0 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

since $B(z;\alpha,\beta)$ is an incomplete beta function with $z = (x/\theta)^{-k}$, Then the cumulative distribution function is given by

$$G(x) = 1 - \frac{B(z;\alpha,\beta)}{B(\alpha,\beta)} = 1 - I_z(\alpha,\beta),$$

where $I_z(\alpha,\beta)$, is the regularized beta function .

In this paper, we describe a new truncated distribution namely, the truncated beta-Pareto (TBP) distribution and study some properties of this distribution, the estimates of the parameters of this distribution is maximum likelihood estimation (MLE). Finally, we provide several applications of the TBP distribution on real datasets.

MATERIALS AND METHODS

1. The Truncated Beta-Pareto Distribution

In this section, we present the shape of probability density function (pdf) for the TBP distribution.

Definition 1: Let X be a random variable with probability density function (pdf) and cumulative distribution function (cdf) defined by $g(x)$ and $G(x)$, respectively. Then the pdf $f(x)$ for the truncated distribution of X over the interval $[A, B]$, where $-\infty < A < B < \infty$ can be obtained by

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{g(x)}{G(B) - G(A)}, & \text{if } A \le x \le B \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

and the cdf of the truncated distribution is

$$F(x) = \frac{G(x) - G(A)}{G(B) - G(A)},$$

(Nadarajah and Kotz, 2006).

Definition 2: Let $X \sim TBP(A, B, \alpha, \beta, \theta, k)$. The pdf is given by

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{k}{D \cdot \theta B(\alpha, \beta)} \left[1 - \left(\dfrac{x}{\theta}\right)^{-k}\right]^{\alpha - 1} \left(\dfrac{x}{\theta}\right)^{-k\beta - 1}, & \text{if } 0 < A \le x \le B;\ x \ge \theta;\ \alpha,\ \beta,\ k > 0 \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

where $D(A, B, \alpha, \beta, \theta, k) = G(B) - G(A) = [1 - I_{(B/\theta)^{-k}}(\alpha, \beta)] - [1 - I_{(A/\theta)^{-k}}(\alpha, \beta)]$,

and the cdf is given by

$$F(x) = \frac{[1 - I_{(x/\theta)^{-k}}(\alpha, \beta)] - [1 - I_{(A/\theta)^{-k}}(\alpha, \beta)]}{[1 - I_{(B/\theta)^{-k}}(\alpha, \beta)] - [1 - I_{(A/\theta)^{-k}}(\alpha, \beta)]}.$$

Next, we will illustrate the graphs of the BP and the TBP pdf $f(x)$ for some parameters $A, B, \alpha, \beta, \theta, k$ where A, B are the truncation point.

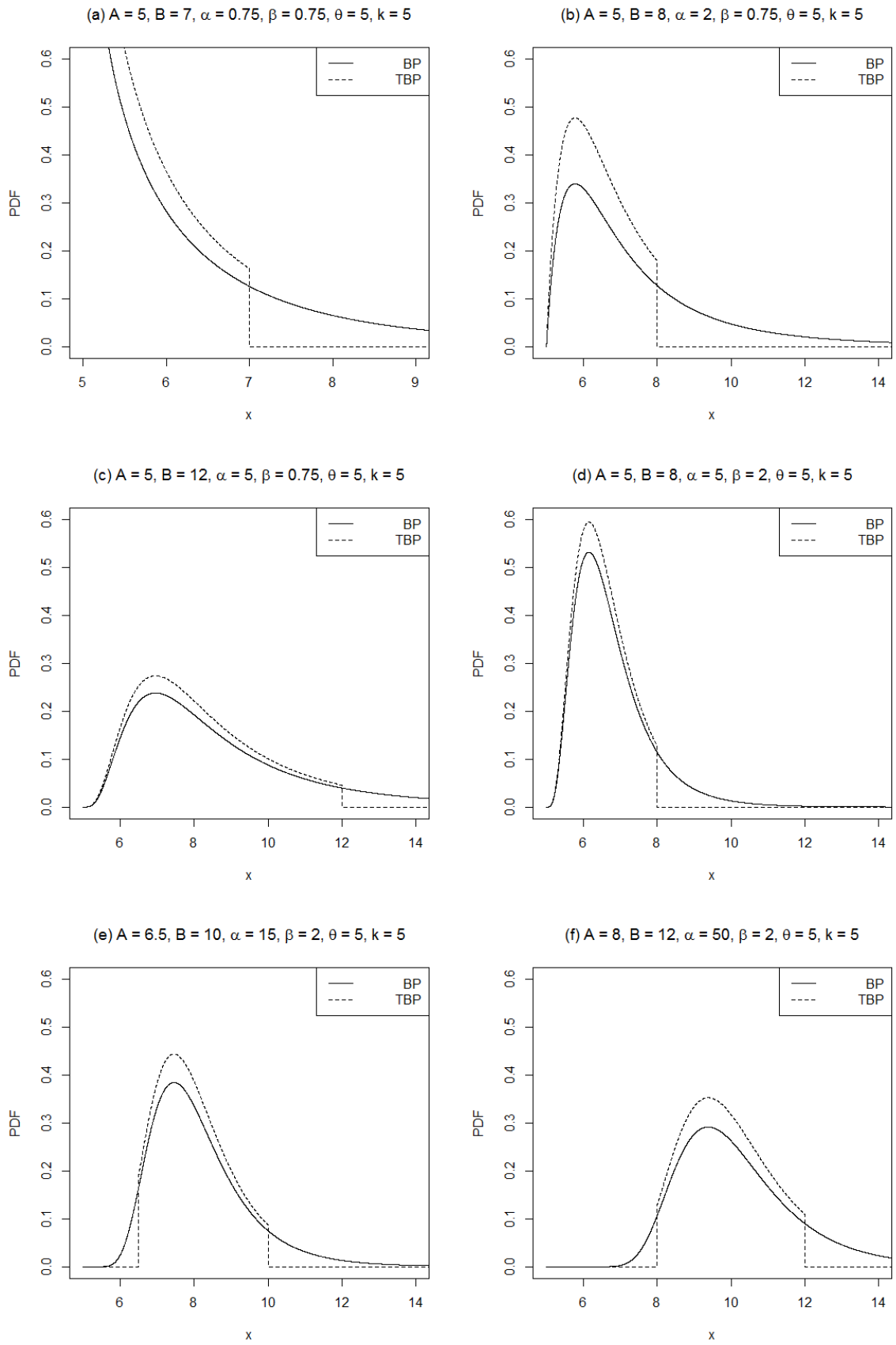


Figure 1 The pdf of BP and TBP distribution with some parameters values.

2. Parameter Estimation

We use the maximum likelihood method to estimate parameters of the TBP distribution.

Let $X_1, X_2, ..., X_n$ be a random sample from $TBP(A, B, \alpha, \beta, \theta, k)$, the likelihood function is obtained by:

$$L(x, A, B, \alpha, \beta, \theta, k) = \prod_{j=1}^{n} \left[\frac{k}{D \cdot \theta B(\alpha, \beta)} \left[1 - \left(\frac{x_j}{\theta} \right)^{-k} \right]^{\alpha - 1} \left(\frac{x_j}{\theta} \right)^{-k\beta - 1} \right]$$

Therefore, the log-likelihood is given by:

$$\begin{aligned} \log L(x, A, B, \alpha, \beta, \theta, k) = & -n \log D + n \log k - n \log \theta \\ & + n(\log \Gamma(\alpha + \beta) - \log \Gamma(\alpha) - \log \Gamma(\beta)) \\ & + (\alpha - 1) \sum_{j=0}^{n} \log \left[1 - \left(\frac{x_j}{\theta} \right)^{-k} \right] - (k\beta + 1) \sum_{j=0}^{n} \log \left(\frac{x_j}{\theta} \right). \end{aligned}$$

Since $x \geq \theta$, the maximum likelihood estimate of θ is the first-order statistic $X_{(1)}$. Similarly, the maximum likelihood estimators of A and B are $\min(x_j)$ and $\max(x_j)$, respectively.

By differentiating the log-likelihood function with respect to α, β, and k, respectively, and equating the results to zero, we then have;

$$\frac{\partial \log L}{\partial \alpha} = -\frac{n}{D} \frac{\partial D}{\partial \alpha} + n[\Psi(\alpha + \beta) - \Psi(\alpha)] + \sum_{j=1}^{n} \log \left[1 - \left(\frac{x_j}{\theta} \right)^{-k} \right] =^{set} 0,$$

$$\frac{\partial \log L}{\partial \beta} = -\frac{n}{D} \frac{\partial D}{\partial \beta} + n[\Psi(\alpha + \beta) - \Psi(\beta)] - k \sum_{j=1}^{n} \log \left(\frac{x_j}{\theta} \right) =^{set} 0,$$

and

$$\frac{\partial \log L}{\partial k} = -\frac{n}{D} \frac{\partial D}{\partial k} + \frac{n}{k} - \sum_{j=1}^{n} \left\{ \beta + (\alpha - 1) \left[1 - \left(\frac{x_j}{\theta} \right)^{-k} \right] \right\} \log \left(\frac{x_j}{\theta} \right) =^{set} 0.$$

We solve this system of equations to obtain the maximum likelihood estimates $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ and $\hat{k}$.

Since, we cannot solve this system of equations algebraically, we use the **optim** in **stats** package of R language (R Core Team, 2015) to obtain the estimates.

RESULTS AND DISCUSSION

1.1 The Wheaton River data

The TBP distribution is fitted to the data set, representing the exceedances of flood peaks (in m^3/s) of the Wheaton river near Carcross in Yukon Territory, Canada. The dataset consists of 72 exceedances for the years 1958-1984, rounded to one decimal place (Akinsete *et al*., 2008), as shown in Table 1,

Table 1. Exceedances of Wheaton river flood data.

1.7	2.2	14.4	1.1	0.4	20.6	5.3	0.7	1.9	13.0	12.0	9.3
1.4	18.7	8.5	25.5	11.6	14.1	22.1	1.1	2.5	14.4	1.7	37.6
0.6	2.2	39.0	0.3	15.0	11.0	7.3	22.9	1.7	0.1	1.1	0.6
9.0	1.7	7.0	20.1	0.4	2.8	14.1	9.9	10.4	10.7	30.0	3.6
5.6	30.8	13.3	4.2	25.5	3.4	11.9	21.5	27.6	36.4	2.7	64
1.5	2.5	27.4	1.0	27.1	20.2	16.8	5.3	9.7	27.5	2.5	27.0

The data are fitted by using the BP distribution and the TBP distribution; The Kolmogorov-Smirnov (K-S) goodness-of-fit statistic was used for the comparison of the fit, while the parameters are estimated by the maximum likelihood estimation. The results are presented in Table 2.

Table 2. Summary statistics for exceedances of Wheaton river flood data.

Distribution	BP	TBP
Maximum likelihood estimates	$\hat{\alpha} = 3.4895,\ \hat{\beta} = 41.9992,$ $\theta^* = 0.1, \hat{k} = 0.0197$	$A^* = 0.1,\ B^* = 64.0,$ $\hat{\alpha} = 3.4820,\ \hat{\beta} = 41.9992,$ $\theta^* = 0.1, \hat{k} = 0.0123$
-log-likehood	324.0581	311.7253
K-S statistic	0.1726	0.0980
p-value	0.0274	0.4932

The results of parameter estimates for this data are shown that the negative log-likelihood of the TBP distribution is smaller than that of the BP distribution based on the MLE. In addition, the *p*-value of the K-S statistic of the TBP distribution is greater than that of the K-S statistic based. For these reasons, the TBP distribution is more appropriate to fit this data than the BP distribution.

1.2 The Charlotte County data

The second dataset presents rainfall (based on area-weighted average values) in inches of the Charlotte county, the U.S. state of Florida. Table 3 shows rainfall data in the Charlotte county for the years 2005-2014

(Available form: https://www.swfwmd.state.fl.us/data/hydrologic/rainfall_data_summaries),

Table 3. Rainfall of the Charlotte county data.

1.33	2.29	5.40	2.99	4.53	15.47	10.37	7.14	4.49	7.98	3.01	0.38
0.61	4.04	0.65	0.18	2.31	8.20	10.29	11.12	6.67	1.36	0.87	2.11
1.02	1.14	0.33	2.26	1.54	5.80	8.93	5.58	6.50	3.61	0.16	1.45
1.95	1.81	3.17	3.60	1.72	8.39	10.34	12.10	5.42	2.06	0.39	1.17
0.61	0.46	1.06	0.83	7.50	7.77	7.20	8.30	6.96	1.29	1.40	4.36
1.97	2.26	8.30	4.71	2.38	5.78	7.04	11.53	6.22	0.10	4.15	1.37
2.45	0.26	4.09	1.49	2.62	6.05	9.31	7.96	6.09	7.05	0.69	0.22
0.56	1.07	0.97	1.69	3.40	11.87	7.14	9.90	4.43	4.64	0.12	2.11
0.17	1.65	1.57	4.31	3.62	12.45	10.25	11.14	10.88	3.08	0.88	0.81
3.90	1.30	4.50	2.21	4.62	6.01	8.09	6.97	10.12	1.92	4.29	0.26

Table 4 shows the parameters estimate using the maximum likelihood estimation, along with the K-S goodness of fit statistic for this dataset.

Table 4. Summary statistics for rainfall of the Charlotte county data.

Distribution	BP	TBP
Maximum likelihood estimates	$\hat{\alpha} = 5.5802,\ \hat{\beta} = 44.9998,$ $\theta^* = 0.1, \hat{k} = 0.0360$	$A^* = 0.1,\ B^* = 15.47,$ $\hat{\alpha} = 3.8529,\ \hat{\beta} = 29.9990,$ $\theta^* = 0.1, \hat{k} = 0.0248$
-log-likehood	428.0786	366.7937
K-S statistic	0.1378	0.0770
p-Value	0.0210	0.4755

According to Table 4, the TBP distribution has a smaller value of the negative log-likelihood. Furthermore, the *p*-value of the K-S statistic of the TBP distribution is greater than that of the K-S statistic. In summary, the TBP distribution is more appropriate to fit this data than the BP distribution.

CONCLUSION

In this work, we proposed the new truncated distribution, namely the truncated beta-Pareto distribution. We described the proposed distribution, and used the method of maximum likelihood for parameter estimation. We also applied the proposed distribution to fit flood and rainfall datasets. Finally, we found that the truncated beta-Pareto distribution is a better fit when compare to the beta-Pareto distribution.

ACKNOWLEDGEMENTS

The first author would like to thank the Science Achievement Scholarship of Thailand (SAST) for the financial support.

REFERENCES

Aban, I. B., M. M. Meerschaert, and A. K. Panorska. 2006. Parameter estimation for the truncated Pareto distribution. **Journal of the American Statistical Association**. 101(473): 270-277.

Akinsete A., F. Famoye and Lee, C. 2008. The beta-Pareto distribution. **Statistics**. 42(6): 547-563.

Johnson N. L., Kotz S., and N. Balakrishnan. 1994. Continuous Univariate Distributions. **Wiley**. 2nd ed, (1): 149-151.

Nadarajah S. and S. Kotz. 2006. R Programs for Truncated Distributions. **Journal of Statistical Software**. 16: 1-8.

Newman, M. E. 2005. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. **Contemporary physics**. 46(5): 323-351.

R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

Zaninetti, L., and M. Ferraro. 2008. On the truncated Pareto distribution with applications. **Open Physics**. 6(1): 1-6.

An Overview of Neutron Activation Analysis (NAA) at Thai Research Reactor (TRR-1/M1)

Jatechan Channuie[1*], Supalak Kongsri[1], Sarinrat Wonglee[1], Wichian Ratanatongchai[1], Sasiphan Khaweerat[1], Roppon Picha[1] Kotchaphan Kanjana[1], Thiansin Liamsuwan[1], Kampanart Silva[1], Jiraporn Promping[1], Chanatip Tippayakul[1] and Dumrongkiat Srilachai[1]

ABSTRACT

For more than fifty years, neutron activation analysis (NAA) has been used for qualitative and quantitative determination of elements for more than 600 samples each year in various samples at Thai Research Reactor-1/ Modification 1 (TRR-1/M1) of the Thailand Institute of Nuclear Technology – such as environmental samples, food samples, archaeological samples, geological samples, and industrial samples. Almost of the reported results were calculated by the relative method in case of small samples (usually less than 100 mg). Recently, non-relative method (k_0-NAA or standardless method) was developed for use in both small and large samples to reduce the cost and increase the number of analyzed elements. This paper will be presented the results in the past, present methods developing, future plan and modern trends for NAA in Thailand.

ไม่มีการเผยแพร่

Key words: Neutron Activation Analysis, Thai Research Reactor

*Corresponding author; e-mail address: **jatechan.c@gmail.com**

[1]Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Ongkharak, Nakhon Nayok, 26120

INTRODUCTION

Neutron activation analysis (NAA) was developed by G. Hevesy and H. Levi in 1936 following the discovery of neutron by J. Chadwick in 1932 and especially the experiments of F. Joliot and I. Curie in 1934 [1]. It has been demonstrated that induced radioactivity can be used for determining the presence of unknown elements in samples. The method is based on conversion of stable atomic nuclei into radioactive nuclei by irradiation with neutrons and subsequent detection of the radiation emitted by the radioactive nuclei and its identification.

Nowadays we well known that neutron as a neutral particle can penetrate deeply even in dense material. Neutrons interact only with nuclei and initiate different nuclear reactions depending from neutron energy. Elastic and inelastic neutron scattering and neutron capture reactions as well as its combination are used for the development of NAA technique. NAA is a powerful method for qualitative and quantitative determination of elements based on measurement of characteristic radiation from radionuclides formed directly or indirectly by neutron irradiation of the material. The most suitable source of neutrons is usually a nuclear research reactor.

For Thailand, the Thai Research Reactor-1/ Modification1 (TRR-1/M1) was first critical in 1962 and still being under operation until present. It is normally operation at 1200 kW thermal power for about 26 hours per week. The swimming pool type reactor has the average in-core neutron flux around 10^{13} n•cm^{-2}•s^{-1}. To date, more than around 70% of the total number of irradiation request is for activation analysis.

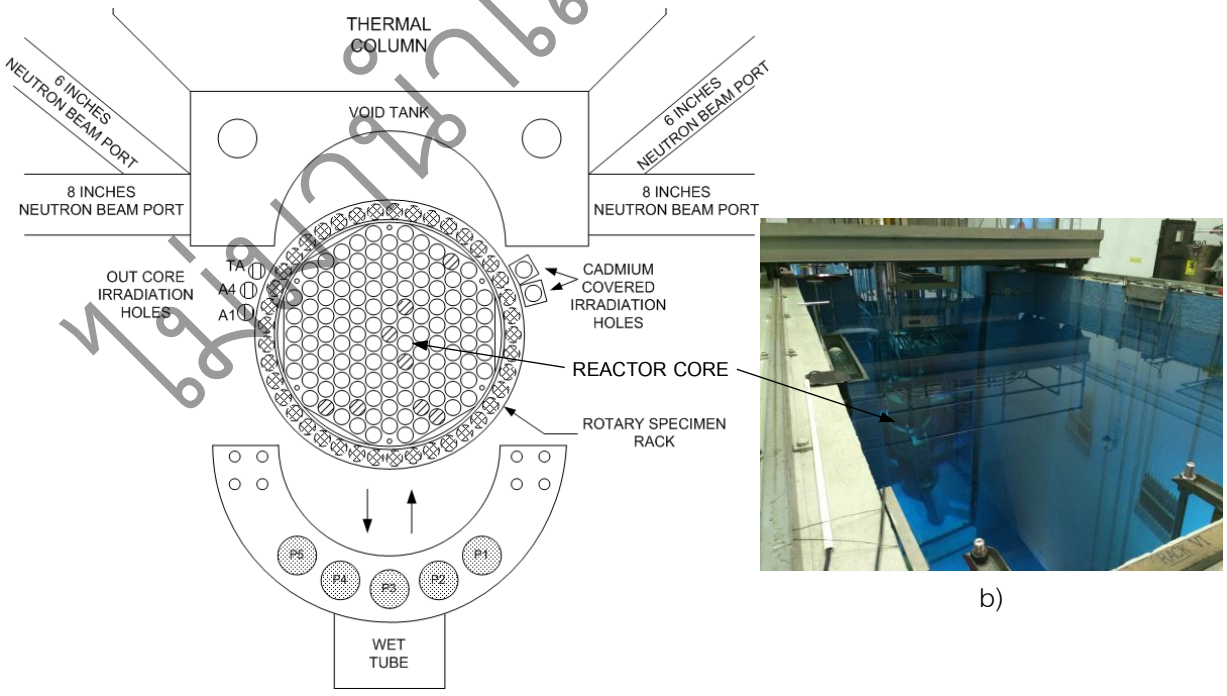


Figure 1 a) Cutaway view of TRR-1/M1 irradiation facilities for NAA,

b) Reactor core and irradiation tubes

METHODS

In the practice, a NAA procedure consists the simultaneous radiation of test portion of the unknown samples and a known amount of a comparator of the same element-serving as a calibrator, and the sequential measurements of the induced radioactivities. The routine procedure of the NAA can be summarized in the Figure 2:

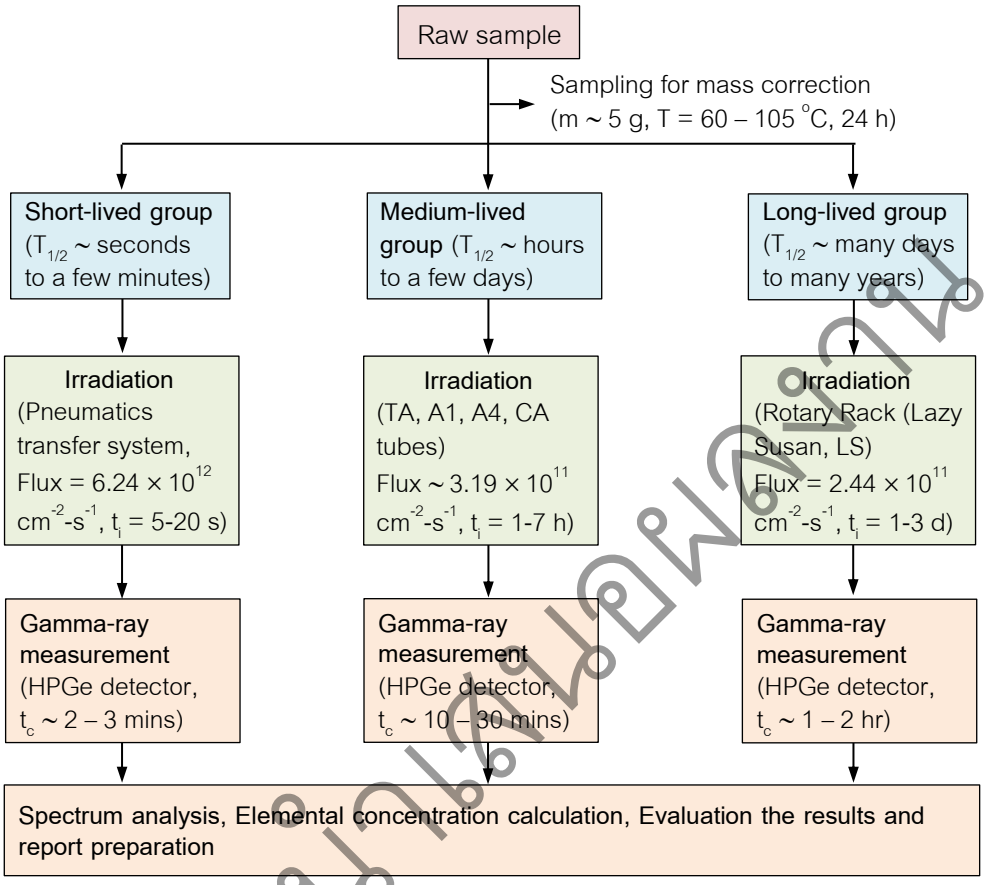


Figure 2 The practical procedure of the NAA at TRR-1/M1

where $T_{1/2}$ = the half-life of the radionuclide

t_i = irradiation time

t_c = counting time or measuring time

Like any other analytical method, test portions of internal quality control materials (including blanks) are following the same steps as the samples and comparators, and are simultaneously irradiated and measured separately.

Gamma-ray Measurement

After the activation process by neutrons, gamma-ray spectrum of each sample was measured by high-purity germanium (HPGe) detector and recorded by the Gamma Acquisition software. The area under the photopeak is a measure of the current transfer in the detector, resulting

from interaction of gamma-ray of corresponding energy in the radiation detector. The current is directly proportional to the number of decaying radioactive nuclei.

The number of decaying radioactive nuclei is directly proportional to the number of stable nuclei of the isotope that underwent a nuclear reaction.

The number of stable nuclei of the isotope is directly proportional to the total number of nuclei of the corresponding element and, assuming given abundances of the stable isotopes, to the total mass of that element in the irradiated test sample. In general, NAA procedure can be divided into two methods for the calculation of elemental concentration:

1. The relative method

The unknown sample is irradiated together with a comparator containing a known amount of the elements of interest. The comparator is measured under the same conditions as a sample (sample-to-detector distance, sample geometry, equivalent sample size and if possible equivalent in composition). From comparison of the net peak areas in the two measured spectra the mass of the element of interest can be calculated:

$$m_{x(unk)} = m_{x(com)} \frac{\left(\frac{C}{t_m e^{-\lambda t_d} \cdot (1 - e^{-\lambda t_c})} \right)_{unk}}{\left(\frac{C}{t_m e^{-\lambda t_d} \cdot (1 - e^{-\lambda t_c})} \right)_{com}}$$

where $m_{x(unk)}$, $m_{x(com)}$ = mass of the element of interest, in unknown sample and comparator, respectively.

C = net peak area

t_d = decay time

λ = decay constant (λ = ln2 /$T_{1/2}$)

In this procedure many of experimental parameters – such as neutron flux, sample geometry correction, neutron cross-section and full-energy peak efficiency cancel out at the calculation of the mass and the remaining parameters are all known. This calibration procedure is used if the highest degree of accuracy is required.

2. k_0-method (or standardless method)

Originally, the k_0-method was defined by F. Girardi, G. Guzzi and J. Pauly [2]. The k_0-method for multielement was based on the ratio of proportionality factors of the element of interest and the comparator element after correcting for saturation, decay, counting, and sample weights.

The expression for the activation reaction rate can be written as:

$$R = \phi_{th}\sigma_0 + \phi_{epi}I_0(\alpha)$$

where ϕ_{th} = the thermal neutron flux,

ϕ_{epi} = the epithermal neutron flux,

σ_0 = the thermal neutron cross-section,

I_0 = the resonance integral, and

α = the epithermal neutron flux shape factor.

The k_0-factor was defined as:

$$k_0 = \frac{M_c\,\theta_t\,\sigma_{0,t}\,\gamma_t}{M_t\,\theta_c\,\sigma_{0,c}\,\gamma_c}$$

where M = the atomic mass number,

θ = the isotope abundance, and

γ = the abundance in the nuclear decay of the gamma-ray measured,

in which the subscripts “t” and “c” refer to the element of interest in the sample and comparator. The mass fraction for an element determined via a directly produced radionuclide was found from:

$$\rho = \frac{1+(Q_{0,c}(\alpha)/f)\,\varepsilon_c}{1+(Q_{0,t}(\alpha)/f)\,\varepsilon_t}\frac{(A/SDCw)_t}{(A/SDCw)_c}\frac{1}{k_0}$$

where ε = the full energy photopeak efficiency of the detector for the energy of the gamma-ray measured [3],

A = the net peak area of the gamma-ray measured,

S = the irradiation factor,

D = the decay factor, and

C = the counting factor.

The k_0-factor has thus become a purely nuclear parameter for the thermal neutron spectrum. In the practice, gold (Au) is proposed as the comparator element. The neutron flux parameters *f* and α no longer cancel out in the concentration calculations and must be measured in each irradiation tube, preferably even for each irradiation and sample. The k_0-NAA is used in TRR-1/M1 for the analysis of small samples and large samples in case of research project.

NAA performance on challenging samples

According to the IAEA’s Co-ordinated Research Project (CRP) in 2012, the IAEA archaeological mock-up was sent to Thailand for non-relative method of neutron activation analysis as part of inter-comparison. Figure 3 shows the piece of the mock-up was used for the experiment. It

ห้ามนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

shall be noted that the piece selected for the experiment presents high degree of asymmetry and is very difficult to approximate and simulate. Therefore, the analysis result could be prone to more errors than usual.



Figure 3 Mock-up archaeological sample for the experiment

The selected piece of the mock-up was then prepared for irradiated in the thermal column facility as shown in Figure 4. Five flux monitors (gold foils) were placed at different locations (front and back) to determine the average neutron flux throughout the whole volume. The mock-up piece was irradiated for 7 hours and cool for 5 days before removing to the gamma measurement facility where the mock-up piece was measured for 1 hour. The measurement was repeated after 11 days cooling. The second measurement took 2 hours.



Figure 4 Mock-up archaeological sample for irradiation

Furthermore, the factor to correct for gamma shielding was calculated using the MCNPX code.

ไม่อนุญาตให้เผยแพร่

RESULTS

The efficiency correction factor as a function of energy to correct for gamma self-shielding in the sample during measurement was calculated by the MCNPX code. It is noted that the reference point source was positioned at the bottom of the sample. The simulation result is shown in Figure 5.

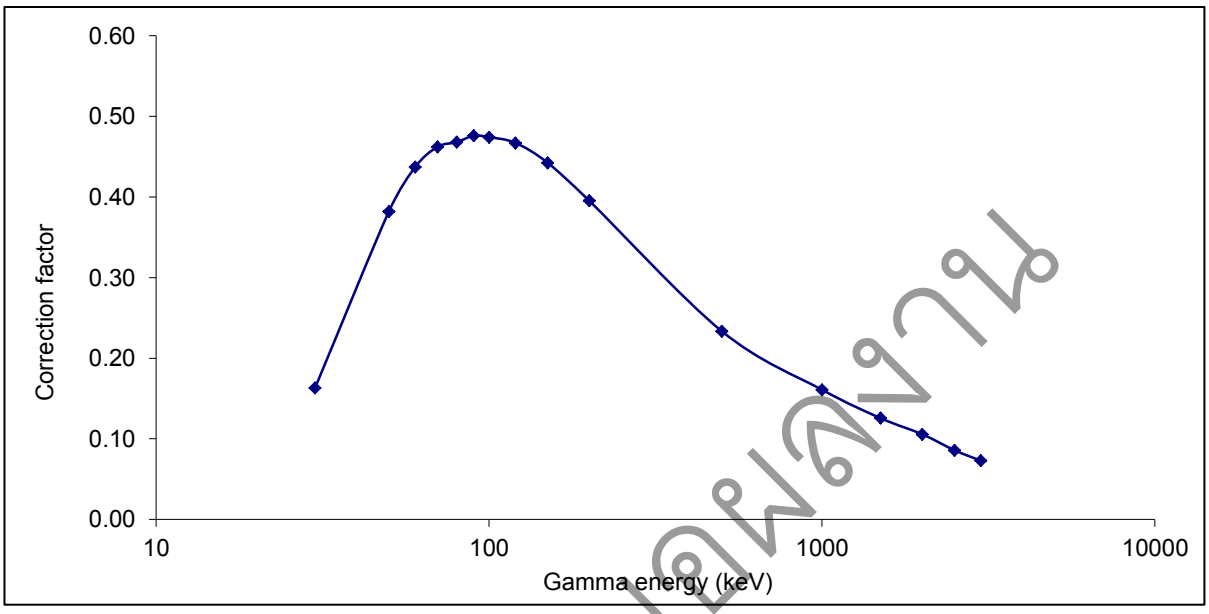


Figure 5 Gamma self-shielding correction factor as a function of energy (IAEA mock-up)

The elemental concentration in the IAEA mock-up was calculated using the k_0-NAA method and MCNPX code. The results are reported in Table 1.

Table 1 Elemental concentration detected in the IAEA large mock-up sample

Element	Concentration (ppm)
Na	11880 ± 226
K	11620 ± 825
Sc	8.389 ± 0.587
As	16.31 ± 4.126
La	13.43 ± 0.483
Fe*	24550 ± 712
Co*	8.767 ± 0.482
Sb*	7.284 ± 0.605

Note: * detected in the 2nd measurement (11 days after irradiation)

ไม่อนุญาตให้เผยแพร่

CONCLUSIONS

The neutron activation analysis (NAA) technique for small samples and large samples was used in this review. The technique in general is promising but still requires more research especially for the validation. Preliminary determination of elemental concentration in the IAEA archaeological mock-up was performed as well. It is, however, suspected that the results would not be as accurate as it should be since the method was not well validated. The important remark from the research is that the methodology is established but needs more elaborations. The future work, we have planned to renovate and develop prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA).

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the CRP project of the International Atomic Energy Agency (IAEA) for initiate the new method of the NAA.

REFERENCES

[1] H. Levi. 1986. Semicentennial Lecture. 7th **International Conference Modern Trends in Activation Anaysis**, Copenhagen, Denmark.

[2] F. Girardi, G. Guzzi and J. Pauly. 1965. Reactor Neutron Activation Analysis by the Single Comparator Method. **Journal of Analytical Chemistry.** 37: 1085-1092.

[3] A. Simonits, F. de Corte and J. Hoste. 1975. Single Comparator Methods in Reactor Neutron Activation Analysis. **Journal of Radioanalytical Chemistry.** 24: 31.

ไม่อนุญาตให้คัดลอกเผยแพร่

การสร้างภาพ 3 มิติ ด้วยโฮโลแกรมรอยขีด

Three-Dimensional Image Construction by Scratch Hologram

สิริพร ท้วมไทย[1] กฤษกร หาญชนะ[1] และ มยุรี หาญสุภานุสรณ์[1*]

Siriporn Thuamthai[1], Kitsakorn Hanchana[1] and Mayuree Hansupanusorn[1*]

บทคัดย่อ

โฮโลแกรมรอยขีดเป็นการสร้างภาพสามมิติด้วยรอยขีดส่วนโค้งวงกลมลงบนแผ่นอะคริลิก โดยอาศัยหลักการสะท้อนของแสงขนาน (specular reflection) งานวิจัยนี้เป็นการสร้างแผ่นโฮโลแกรมรอยขีดและระบบบันทึกภาพ เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดภาพลูกบาศก์ 3 มิติ จากต้นแบบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 มิติ ระบบบันทึกภาพ ใช้แสงจากหลอดไฟตกกระทบลงบนแผ่นโฮโลแกรม และใช้กล้องถ่ายรูปดิจิตอลบันทึกภาพแสงสะท้อน โดยตำแหน่งของกล้องแทนตำแหน่งมุมมองของผู้สังเกตซึ่งออกแบบให้เลื่อนเข้า-ออกและหมุนมุมไปทางซ้าย-ขวาได้ พบว่าปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลและนำไปสู่การเกิดภาพที่สมบูรณ์ คือ การมีแรงกดที่เบา รัศมีความโค้งน้อย และระยะห่างระหว่างรอบขีดน้อย ผลของลักษณะรอยขีดวงกลม พบว่า ส่วนที่เป็นโค้งนูนจะให้ภาพแนวลึก ส่วนรอยขีดโค้งเว้าจะให้ภาพแนวตื้น และการเลื่อนตำแหน่งของมุมกล้องหรือมุมมองผู้สังเกตในทิศเข้า-ออกจะได้ภาพที่มีความลึกและตื้นเปลี่ยนไป และเมื่อหมุนมุมไปทางด้านซ้าย-ขวา จะได้ภาพที่เปลี่ยนในด้านข้าง

ABSTRACT

Scratch hologram is a method for creating a 3-dimensional image by scratching in circular arcs on a shiny acrylic surface and the image is formed on the basis of specular reflection. This research work involves construction of a scratch hologram recording unit and study of factors affecting quality of the 3D cubic holograms created from a square outline. The recording unit consisted of a flash light projecting on the scratched surface and digital camera to record the reflected image. Position of the camera can be moved both in-out and left-right directions. The studied results found that basic factors that affect quality of hologram image are scratching pressure, radius of circular arcs and spacing between each circular arcs. Good hologram images can be obtained when using light scratching pressure, small radius of arc and small space between arcs. The effect of circular arcs indicated that the convex curves give rise to the deep side of image while the concave curves yield the shallow side of image. Moving camera or observe eyes in the in-out direction resulted in the change in depth of hologram while moving in the left-right direction gave different in the side-view of hologram.

Key Words: Scratches Hologram, 3-dimensional image

[*]Corresponding author; e-mail address: **mayuree.kit@kmutt.ac.th**

[1]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10104

[1]Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

คำนำ

ใน ค.ศ. 1992 Plummer and Gardner สังเกตเห็นภาพระหว่างการขัดพื้นผิวหน้าของเครื่องขัด พบว่ารอยขีดปรากฏเป็นภาพโฮโลแกรมอยู่สูงและต่ำกว่าพื้นผิว ภาพโฮโลแกรมสามารถสร้างด้วยเครื่องมือทางกล

ใน ค.ศ. 2003 Beaty พบว่าโฮโลแกรมสามารถสร้างได้ง่าย โดยสร้างรอยขีดส่วนโค้งวงกลมด้วยวงเวียนลงบนแผ่นอะคริลิกจากภาพต้นแบบที่ถูกกำหนดจุดรอบภาพ เมื่อนำรอยขีดไปส่องกับแสงจะเห็นจุดสว่างของแสงเรียงต่อกันเป็นภาพ และสามารถขยับเคลื่อนไหวได้ตามตำแหน่งของผู้สังเกต

ใน ค.ศ. 2003 Eichler et al. ศึกษารอยขีดโค้งวงกลมบนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่วาดลงบนแผ่นอะคริลิก โดยใช้วงกลมที่มีจุดศูนย์กลางเดียวกันและจุดศูนย์กลางต่างกัน พบว่าภาพเกิดจากแสงสะท้อนภายในร่องรอยขีด เรียกว่า Scratch holograms การมองเห็นของตาทั้งสองข้าง Stereoscopic effects และการประมวลผลของสมอง ทำให้เห็นเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เกิดขึ้น

จากการทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องโฮโลแกรมรอยขีด พบว่ายังไม่มีงานใดแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดภาพ และแยกให้เห็นองค์ประกอบของการเกิดภาพที่ชัดเจน อีกทั้งหัวข้อเรื่อง Scratch holograms เป็นโจทย์ปัญหาข้อหนึ่งในโจทย์การแข่งขันฟิสิกส์สัประยุทธ์ปี 2014 สำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่ต้องค้นหาคำตอบจากโจทย์ปลายเปิด การศึกษาในครั้งนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาความแตกต่างระหว่างการสร้างภาพ 3 มิติ จากรอยขีดส่วนโค้งวงกลมและวงกลม ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดจุดสว่างของแสง (แรงกดของวงเวียน รัศมีความโค้ง และระยะห่างระหว่างจุด) ศึกษาผลของรอยขีดวงกลมซ้อนกันที่จุดศูนย์กลางเดียวกัน และจุดศูนย์กลางต่างกันมีผลต่อการสร้างภาพและการมองเห็นภาพ ผลของตำแหน่งการมองกับการเกิดภาพ งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาในวิชาฟิสิกส์สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์สำหรับสร้างแผ่นโฮโลแกรมรอยขีดและระบบบันทึกภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางแสง

แผ่นอะคริลิกสีดำบาง 2 มิลลิเมตร วงเวียนปลายแหลมทั้งสองด้าน ไม้บรรทัด กล้องถ่ายรูป Nikon D7000 เลนส์ Nikon 16-85 mm พร้อมชุดยึดจับที่ประกอบสร้างขึ้น ชุดยึดจับแสงจากหลอดไฟแสงขาว POLICE 7000 W CL-124 ไม้โปรแทรกเตอร์และตลับเมตร

วิธีการสร้างแผ่นโฮโลแกรมรอยขีดและระบบบันทึกภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางแสง

วิธีการสร้างแผ่นโฮโลแกรมรอยขีด

ขั้นตอนนี้แสดงการจำลองการสร้างแผ่นโฮโลแกรมรอยขีดโดยการสร้างรอยขีดเส้นตรงและเส้นโค้ง (Figure 1) แบ่งเป็น 3 ส่วน A ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดจุดสว่างของแสง (Figure 1, a – f) เมื่อแสดงรอยขีดเส้นตรง แรงกดวงเวียนเบา (a) และรอยขีดเส้นตรง แรงกดวงเวียนหนัก (b) เมื่อรัศมีความโค้งวงเวียน 2 cm (c) และ 4 cm (d) และเมื่อระยะห่างระหว่างรอยขีดโค้งซ้อนกันห่างกัน 1 mm (e) และ 2 mm (f) ที่รัศมีความโค้งวงเวียน 2.5 cm ทั้งนี้ (c - f) ใช้แรงกดเบาตลอดการทดลอง B เพื่อศึกษาองค์ประกอบของการเกิดภาพ 3 มิติ (Figure 1, g - i) เมื่อสร้างวงกลมรัศมีความโค้ง 2.5 cm 1 วง (g) สร้างวงกลมซ้อนกันที่จุดศูนย์กลางเดียวกันรัศมีความโค้ง 2.5 cm ลดลงครั้งละ 1 mm (h) และสร้างวงกลมซ้อนกันรัศมีความโค้ง 2.5 cm และจุดศูนย์กลาง

เลื่อนครั้งละ 1 mm (i) C เพื่อศึกษาการประกอบสร้างภาพ 3 มิติ จากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Figure 1, j - n) เมื่อเริ่มต้นสร้างรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 5 x 5 cm กำหนดจุดลงบนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสห่างกัน 1 mm จากนั้นกางวงเวียนรัศมีความโค้ง 2.5 cm สร้างวงกลมซ้อนกันโดยจุดศูนย์กลางเลื่อนขยับไปครั้งละ 1 mm จนครบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (l) ส่วน (j) และ (k) ทำการแยกศึกษารูปครึ่งวงกลมโค้งนูนและโค้งเว้า ตามลำดับ ส่วน (m) สร้างวงกลมซ้อนกันที่จุดศูนย์กลางเดียวกันรัศมีความโค้ง 2.5 cm ลดลงครั้งละ 1 mm บริเวณมุมทั้ง 4 ของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อประกอบส่วนประกอบทั้งหมด (l) และ (m) รวมกันจะได้แผ่นโฮโลแกรมรอยขีดที่สร้างจากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่สมบูรณ์ (n) จากนั้นนำแผ่นโฮโลแกรมรอยขีดที่ได้ไปส่องแสงสว่างภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอาจเป็นแสงจากดวงอาทิตย์หรือแสงจากหลอดไฟสามารถสังเกตเห็นภาพเกิดขึ้นได้

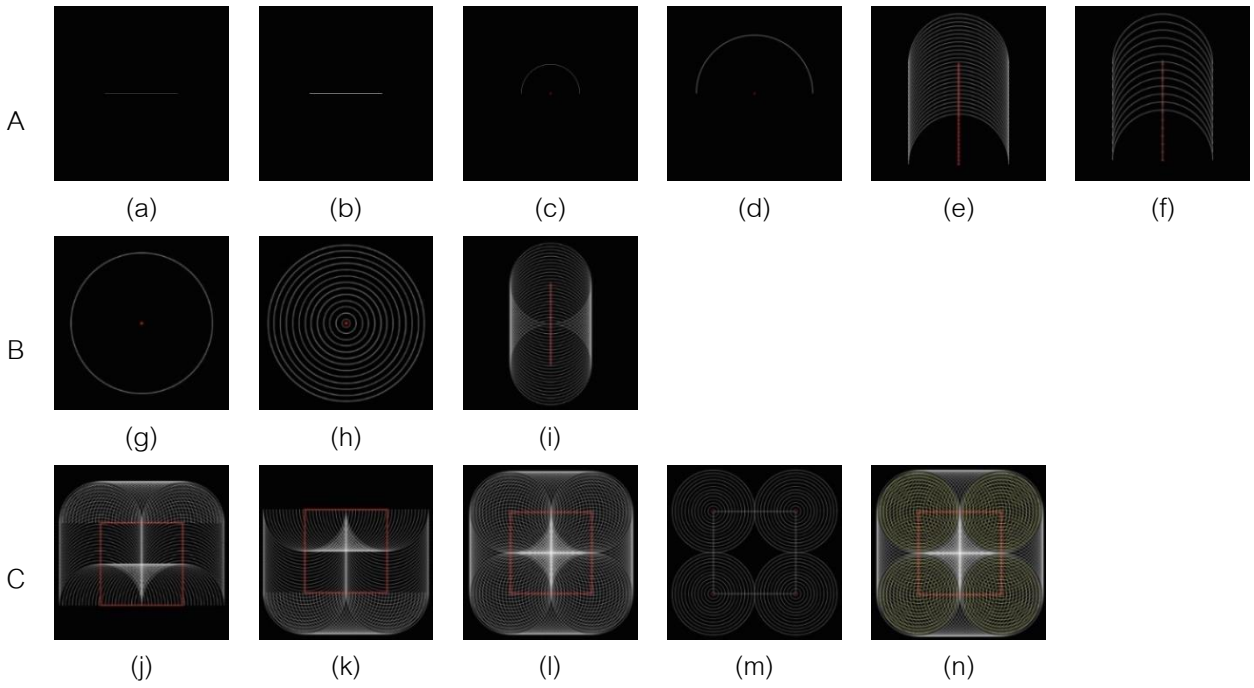


Figure 1 The process of scratches on a piece of acrylic created by light pressure (a) vs. hard pressure (b), semicircular scratch with R = 2 cm (c) vs. R = 4 cm (d), set of semicircular scratchs with spacing d = 1 mm (e) vs. d = 2 mm (f), circular scratch with R = 2.5 cm (g), concentric circular scratches (h), stacked circular scratches (i), convex semicircular scratches (j), concave semicircular scratches (k), stacks of concentric circular shapes with their centers located at the corner of a square (l), concentric circular shapes with their centers located at the corner of a square (m), and complete scratches (n).

วิธีการออกแบบติดตั้งระบบบันทึกภาพ

กำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงสูง 57 เซนติเมตร วางห่างจากแผ่นอะคริลิก 125 เซนติเมตร แสงตกกระทบแผ่นโฮโลแกรมรอยขีดที่มุมตกกระทบเท่ากับ 65.5 องศา เทียบกับเส้นปกติ จากนั้นเลื่อนกล้องที่มีความสูง100 เซนติเมตร ไปรับภาพที่ตำแหน่ง 219 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนของแสงพอดี ซึ่งตำแหน่งนี้คือตำแหน่ง A_0 จะเป็นจุดเริ่มต้นของมุมกล้องที่ก้มลงทำมุมเท่ากับ 65.5 องศากับแนวดิ่งคงที่ตลอด

การทดลอง จากนั้นสามารถเลื่อนตำแหน่งของกล้องไปทาง $+A_n$ หรือไปทาง $-A_n$ จนกระทั่งมองไม่เห็นภาพ (Figure 2) เพื่อศึกษาลักษณะของภาพที่ปรากฏเมื่อเลื่อนตำแหน่งผู้สังเกตเข้า – ออก ต่อจากนั้นศึกษาลักษณะของภาพที่ปรากฏเมื่อเลื่อนตำแหน่งผู้สังเกตไปทางซ้าย L_n และทางขวา R_n (Figure 3) โดยขั้นตอนนี้ใช้ตำแหน่งที่ได้ภาพชัดเจนที่สุดจาก Figure 2

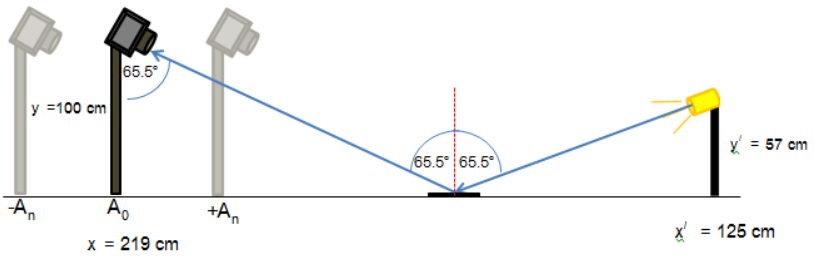


Figure 2 The in-out positions of the camera according to the law of light reflection.

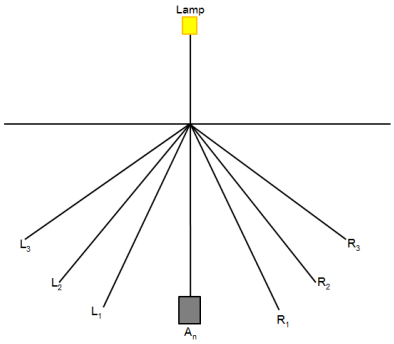


Figure 3 The left-right positions of the camera at various angles of view.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาพฤติกรรมทางแสงของแผ่นโฮโลแกรมรอยขีด

A ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดจุดสว่างของแสง

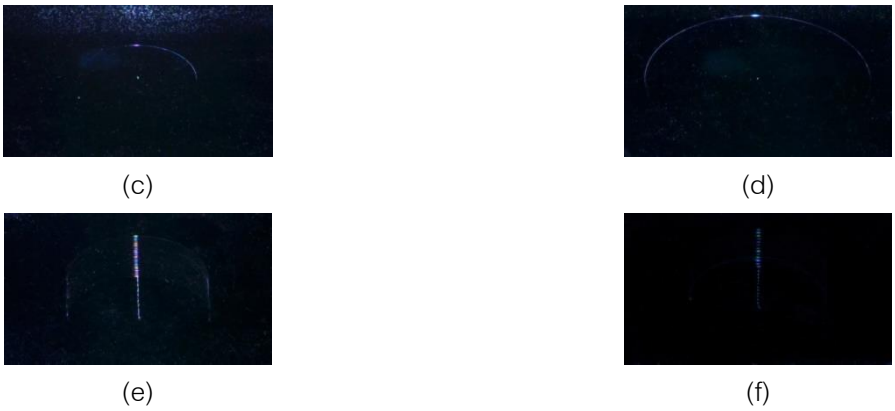
จากผลการเปรียบเทียบ (Figure 4 a และ b) เมื่อสร้างรอยขีดเส้นตรง พบว่าถ้าออกแรงกดวงเวียนเบาให้มีลักษณะคล้ายรอยขนแมวจะทำให้เกิดจุดสว่างของแสงปรากฏขึ้นบนแผ่นอะคริลิกบริเวณกลางแผ่น แต่ถ้าออกแรงกดวงเวียนหนักจนกระทั่งมีเศษอะคริลิกหลุดออกมา พบว่าไม่เกิดจุดสว่างของแสง ดังนั้นปัจจัยแรกที่จะทำให้เกิดจุดสว่างของแสง คือ ต้องเป็นรอยขีดเบา จากผลการเปรียบเทียบ (Figure 4 c และ d) ถ้ารัศมีความโค้งของรอยขีด R = 2 cm พบว่าจุดสว่างของแสงมีขนาดเล็กและมีความชัดเจนกว่ารัศมีความโค้ง R = 4 cm จากผลการเปรียบเทียบ (Figure 4 e และ f) ถ้าระยะห่างระหว่างรอยขีด d = 1 mm จะทำให้จุดสว่างของแสงเกิดขึ้นใกล้กันและต่อเนื่องประกอบกันเป็นเส้นส่งผลให้เกิดภาพสมบูรณ์ชัดเจนกว่าที่ระยะห่างระหว่างรอยขีด d = 2 mm



(a)



(b)



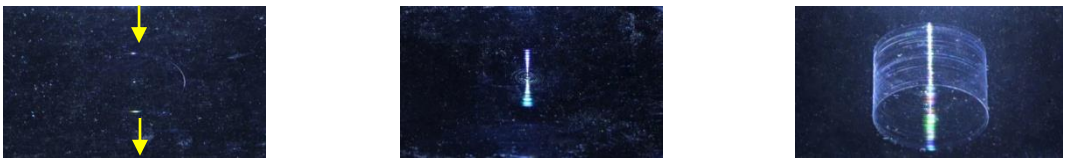
(c) (d)

(e) (f)

Figure 4 Photographs of reflected light from the scratces created by light pressure (a) vs. hard pressure (b), semicircular scratch with R = 2 cm (c) vs. R = 4 cm (d), stacked semicircular scratchs with distance d = 1 mm (e), vs d = 2 mm (f).

B องค์ประกอบของการเกิดภาพ 3 มิติ

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดจุดสว่างของแสงบนรอยขีดส่วนโค้งวงกลม พบว่าแรงกดของวงเวียน รัศมีความโค้งและระยะห่างระหว่างรอยขีดที่เหมาะสมมีผลต่อการเกิดจุดสว่างของแสง ดังนั้นถ้ารอยขีดวงกลมเต็มวงจะปรากฏจุดสว่างของแสงเช่นเดียวกัน โดยจุดสว่างของแสงที่ปรากฏจะเกิดบนส่วนโค้งวงกลมทั้งด้านบน เรียกว่า โค้งนูน (convex curve) และด้านล่าง เรียกว่า โค้งเว้า (concave curve) เทียบกับผู้สังเกต โดยจุดสว่างของแสงทั้งสองจะอยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกัน แต่พบว่าขนาดจุดสว่างของแสงไม่เท่ากันเมื่อฉายแสงให้ตกกระทบลงบนแผ่นโฮโลแกรม โดยผู้สังเกตอยู่ในด้านตรงข้าม ส่วนโค้งวงกลมด้านโค้งนูนที่อยู่ไกลตาจะมีขนาดจุดสว่างของแสงเล็กกว่าด้านโค้งเว้าที่อยู่ใกล้ตา (Figure 5a) เมื่อนำวงกลมหลายวงซ้อนกันที่จุดศูนย์กลางเดียวกัน (Figure 5b) พบว่าจุดสว่างของแสงในแต่ละรอยขีดของวงกลมทั้งโค้งนูนและโค้งเว้าจะเกิดจุดสว่างของแสงต่อเนื่องกันเป็นเส้นตรง แต่ขนาดความกว้างของเส้นตรงไม่เท่ากัน เนื่องจากจุดสว่างของแสงที่เกิดขึ้นจากรอยขีดมีรัศมีความโค้งไม่เท่ากัน ถ้ารัศมีความโค้งน้อยจุดสว่างของแสงจะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับรัศมีความโค้งมาก และเมื่อเปรียบเทียบรอยขีดที่รัศมีความโค้งค่าเดียวกัน พบว่าจุดสว่างของแสงของโค้งนูนจะมีขนาดเล็กกว่าโค้งเว้า จึงทำให้เส้นตรงที่มองเห็นมีขนาดเล็กที่บริเวณจุดศูนย์กลางความโค้ง เสมือนเส้นตรงนั้นมีความลึกตื้นเกิดขึ้น แต่ถ้านำวงกลมหลายวงซ้อนกันที่จุดศูนย์กลางต่างกัน (Figure 5c) โดยกำหนดให้ระยะห่างของรอยขีดใกล้กัน พบว่าจุดสว่างของแสงในแต่ละรอยขีดของวงกลมทั้งโค้งนูนและโค้งเว้าจะเกิดจุดสว่างของแสงต่อเนื่องกันเป็นเส้นตรงและมีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากรอยขีดของวงกลมมีรัศมีความโค้งเท่ากัน



(a) (b) (c)

Figure 5 Photographs of reflected light from the scratces created by circular scratch with R= 2.5 cm (a), concentric circular scratches (b), stacked circular shapes (c).

C การประกอบสร้างภาพ 3 มิติ จากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

จากการศึกษาองค์ประกอบของการเกิดภาพ 3 มิติ สามารถนำมาสร้างภาพ 3 มิติ จากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 มิติ, 1 ด้าน เป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ 3 มิติ, 6 ด้านได้ โดยจุดสว่างของแสงที่เกิดจากรอยขีดครึ่งวงกลมโค้งนูนในแต่ละรอยขีดจะเชื่อมต่อเนื่องกันเป็นเส้นตรงทั้งหมด 4 เส้น ประกอบกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมปรากฏอยู่ด้านหลังของตำแหน่งรอยขีด (Figure 6a) ส่วนจุดสว่างของแสงที่เกิดจากรอยขีดครึ่งวงกลมโค้งเว้าในแต่ละรอยขีดจะเชื่อมต่อเนื่องกันเป็นเส้นตรงทั้งหมด 4 เส้น ประกอบกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมปรากฏอยู่ด้านหน้าของตำแหน่งรอยขีด (Figure 6b) เนื่องจากรอยขีดโค้งเว้าขนาดจุดสว่างของแสงจะใหญ่กว่าโค้งนูน จึงมองเห็นรูปสี่เหลี่ยมปรากฏคล้ายอยู่ใกล้ตามากกว่าโค้งนูน ดังนั้นถ้าสร้างรอยขีดวงกลมเต็มวงซึ่งประกอบด้วยโค้งนูนและโค้งเว้า พบว่าภาพที่ปรากฏนั้นจะได้รูปสี่เหลี่ยมจำนวน 2 รูป เกิดขึ้นพร้อมกันเป็นผนังด้านหน้าและผนังด้านหลังของรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (Figure 6c) ต่อมาเมื่อสร้างรอยขีดหลายวงซ้อนกันที่จุดศูนย์กลางเดียวกันที่มุมทั้ง 4 ของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส พบว่าจะปรากฏภาพของผนังสี่เหลี่ยมรูปลูกบาศก์เพิ่มขึ้นอีก 4 ด้าน คือ ด้านบน ด้านล่าง ด้านซ้าย และด้านขวา (Figure 6d) ดังนั้นถ้านำส่วนของ (c) และ (d) มาประกอบรวมกันจะได้รูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ประกอบกันครบทั้ง 6 ด้าน กลายเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ 3 มิติ (Figure 6e)

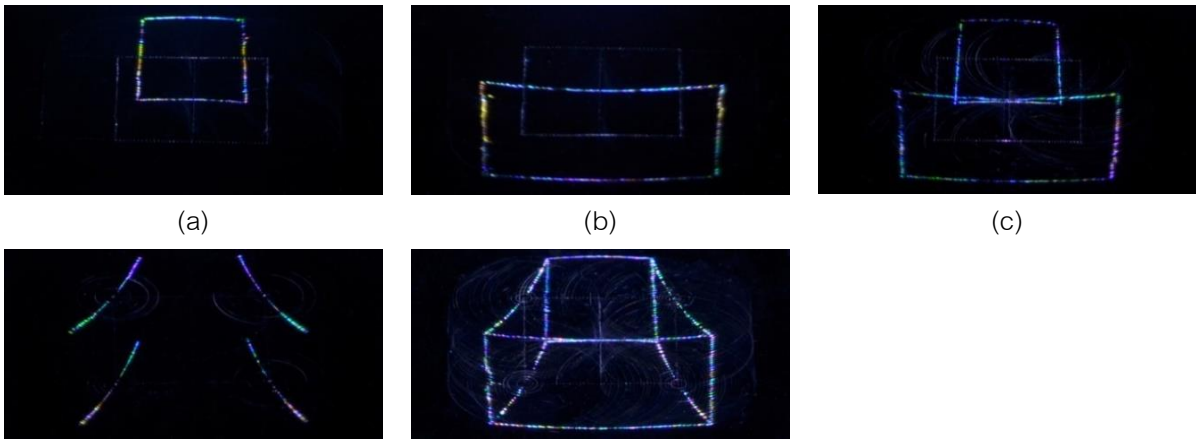


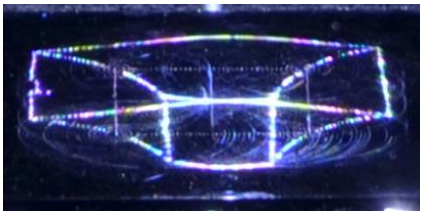
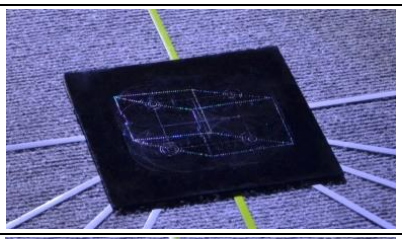
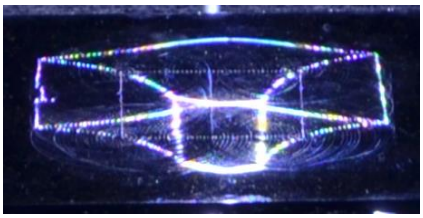
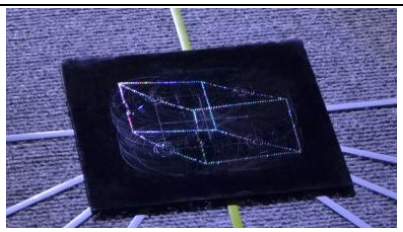
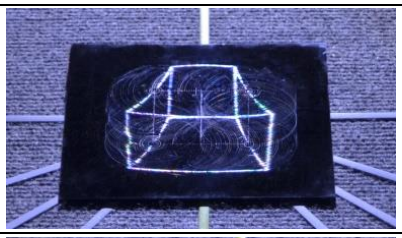
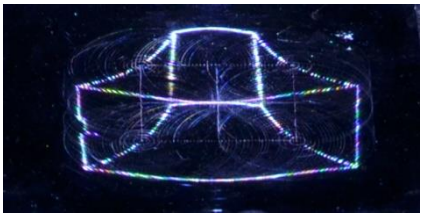
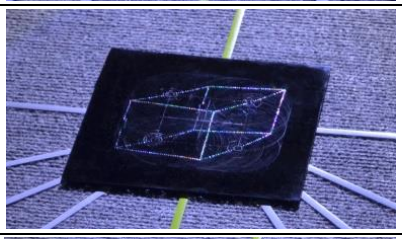
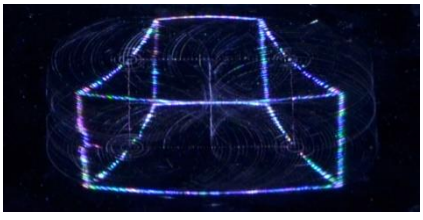
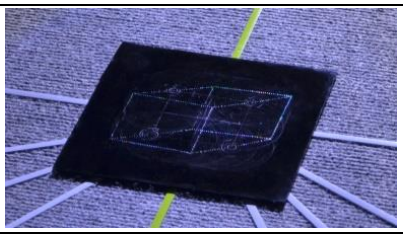
Figure 6 The hologram cubic images created from the scratches, in which (a) convex semicircular scratches, (b) concave semicircular scratches, (c) stacks of concentric circular shapes with their centers located at the square corners (d) concentric circular shapes with their centers located at the square corners, and (e) complete scratches.

ผลการศึกษาภาพที่ปรากฏที่ตำแหน่งการมองต่างกันและมุมมองที่เปลี่ยนไป

จาก (Figure 2 , Table 1) เมื่อตำแหน่งมุมมองอยู่ในแนวตรง พบว่าที่ตำแหน่ง A_0 คือ ตำแหน่งที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนเป็นตำแหน่งเริ่มต้นเห็นหลอดไฟปรากฏอยู่บริเวณตรงกลางภาพ เมื่อเลื่อนตำแหน่งกล้องเข้าใกล้มากขึ้น คือที่ตำแหน่ง $+A_n$ จะปรากฏภาพสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีผนังด้านหน้ากว้างกว่าผนังด้านหลัง เนื่องจากเมื่อเลื่อนตำแหน่งกล้องเข้าใกล้มากขึ้นที่ตำแหน่ง $+A_n$ จะทำให้ตำแหน่งของมุมตกกระทบกับมุมสะท้อนเปลี่ยนไปกล่าวคือตำแหน่งที่แสงตกกระทบจะปรากฏอยู่ด้านบนของแผ่นโฮโลแกรม ทำให้จุดสว่างของแสงบนรอยขีดที่อยู่ไกลตามีขนาดเล็กกว่าจุดสว่างของแสงบนรอยขีดที่อยู่ใกล้ตา แต่ในทางกลับกันเมื่อเลื่อน

ตำแหน่งกล้องออกห่างไปทาง $-A_n$ จะปรากฏภาพสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีผนังด้านหน้าแคบกว่าผนังด้านหลัง เนื่องจากเมื่อเลื่อนตำแหน่งกล้องออกห่างมากขึ้นที่ตำแหน่ง $-A_n$ จะทำให้ตำแหน่งมุมตกกระทบกับมุมสะท้อนเปลี่ยนไปเช่นเดียวกันกล่าวคือตำแหน่งที่แสงตกกระทบจะปรากฏอยู่ด้านล่างของแผ่นโฮโลแกรม ทำให้จุดสว่างของแสงบนรอยขีดที่อยู่ไกลตามีขนาดใหญ่กว่าจุดสว่างของแสงบนรอยขีดที่อยู่ใกล้ตา ซึ่งปกติการมองเห็นภาพ 3 มิติ โดยทั่วไปเราจะเห็นส่วนตื้นลอยขึ้นมาอยู่ด้านหน้า ส่วนด้านลึกจะอยู่ด้านหลัง ดังนั้นตำแหน่งมุมมองที่เห็นโดยทั่วไปควรอยู่ในช่วงตำแหน่ง $+A_n$ ต่อมาทำการหมุนปรับมุมมองไปขวา R_n และทางซ้าย L_n พบว่าเมื่อเปลี่ยนมุมมองไปทางซ้ายภาพจะหมุนไปทางขวาทำให้เห็นผนังด้านซ้ายชัดเจน ในขณะที่ปรับมุมมองไปทางขวาภาพจะหมุนไปทางซ้ายทำให้เห็นผนังด้านขวาชัดเจน เนื่องจากจุดสว่างของแสงบนรอยขีดวงกลมอยู่ในแนวตรงข้ามกัน เมื่อผู้สังเกตเปลี่ยนมุมมองจุดสว่างของแสงจะหมุนในทิศตรงข้ามกันซึ่งเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสง โดยขอบเขตมุมมองที่สามารถมองเห็นเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ครบทุกด้านอยู่ในช่วงไม่เกิน 30 องศา ถ้ามุมมองมากกว่านี้จะมองไม่เห็นภาพ

Table 1 Images from the complete holograms observed from several positions of the camera

Image	position	Image	position
	$-A_2$ (out)		L_2
	$-A_1$ (out)		L_1
	A_0		A_n
	$+A_1$ (in)		R_1
	$+A_2$ (in)		R_2

สรุป

แรงกด รัศมีความโค้งและระยะห่างระหว่างรอยขีดเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อการเกิดจุดสว่างของแสง โดยแรงกดต้องเบา รัศมีความโค้งน้อยทำให้จุดสว่างคมและชัดเจนกว่ารัศมีความโค้งมาก ระยะห่างระหว่างจุดที่ติดกันทำให้ได้จุดสว่างที่อยู่ใกล้กันเรียงประกอบกันเป็นเส้นนำไปสู่การเกิดภาพที่สมบูรณ์

องค์ประกอบของการเกิดภาพ 3 มิติ จะประกอบด้วยเส้นตรงของแสงที่เกิดจากจุดสว่างของแสงจากรอยขีดวงกลมเต็มวงซ้อนกันที่จุดศูนย์กลางเดียวกัน และจุดศูนย์กลางต่างกัน จากหลักการดังกล่าวนำมาใช้ประกอบสร้างภาพ 3 มิติ จากรูปต้นแบบ 2 มิติได้ เช่น จากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

การเลื่อนตำแหน่งมุมมองของผู้สังเกตเข้า – ออก และเลื่อนด้านซ้าย – ขวา มีผลต่อการเกิดภาพ 3 มิติ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่ให้การสนับสนุนทุนโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) สำหรับข้าราชการครูประจำปีการศึกษา 2556 ขอขอบคุณอาจารย์ประเจิด อู่อะรุญ และโรงเรียนเสาไห้ “วิมลวิทยานุกูล” ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ปฏิบัติการทดลองและอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารอ้างอิง

Beaty, W. 2003. Drawing Holograms by hand. **Proc. SPIE** 5005: 156-167.

Eichler, J., L. Dunkel and O. Goncalves. 2003. Three-dimensional image construction by curved surface scratches. **Applied Optics** 42 : 5627-5633.

Plummer, W. T. and L. R. Gardner. 1992. A mechanically generated hologram. **Applied Optics** 31: 6585-6588.

Effects of leaf and rhizome extracts of *Typha angustifolia* L. on seed germination and seedling growth of giant mimosa (*Mimosa pigra* L.)

Phetphan Namwat[1] Ornusa Khamsuk[1] and Srisom Suwanwong[1*]

ABSTRACT

The research was studied on the effects of leaf and rhizome extract of *Typha angustifolia* L. by soaking in water for 12 h. The extract concentrations at 25, 50, 75 and 100 g/l were investigated on seed germination and seedling growth of giant mimosa (*Mimosa pigra* L.). The results showed that leaf and rhizome extract did not inhibit seed germination but they restricted seedling growth of giant mimosa. The rhizome extract at concentration of 100 g/l showed the maximum reduction (21.59% and 10.07%) in the shoot and root length of giant mimosa while leaf extract reduced lesser. Both extracts did not affect malondialdehyde (MDA) content. Thus, the lipid peroxidation had no effect on seedling growth inhibition of giant mimosa.

Key words: *Typha angustifolia* L., giant mimosa, aqueous extract

[*] Corresponding author; e-mail address: **fscisss@ku.ac.th**

[1]Department of Botany, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok,10900

INTRODUCTION

Agriculture used synthetic herbicide for weed control. Synthetic herbicides were repeatedly used, it may cause to the persistence in the environment, damage other organisms and also may lead to weed resistance (Baker *et al.*, 2013). Allelopathy refers to the beneficial or harmful effects of one plant on another plant and release of biochemicals, known as allelochemicals. Allelochemicals were found in various parts of plants including roots, rhizomes, stems, leaves, pollen, seeds and flowers. They are released into the environment by root exudation, leaching, volatilization and decomposition (Rice, 1984). Thus, the allelopathy has been widely used in agriculture.

Typha is monocot genus of the family Typhaceae with about 12 species distributed in the tropic and temperate regions (Londonkar *et al.*, 2013). In Thailand, *Typha angustifolia* L. is exotic invasive species in wetland that often forms monocultures. *T. angustifolia* L. had a strong allelopathic effect on *Bolboschoenus fluviatilis* (Torr.) Sojak (river bulrush), reducing root and shoot length and total biomass (Jarchow and Cook, 2009) and some phytochemistry of genus *Typha* such as flavones, phenolic compound, triterpinoid have been isolated (Shode *et al.*, 2002). It showed that, *T. angustifolia* L. may release allelochemicals to inhibit the growth of other plants. In this study, giant mimosa (*Mimosa pigra* L.) and *Allium cepa* L. were tested by leaf and rhizome extracts of *T. angustifolia* L.

MATERIALS AND METHODS

1. Plant materials and aqueous extract

T. angustifolia L. was collected from the area of Kasetsart University and was washed throughly with water to remove soil matter. Then, the leaves and rhizomes were grounded separately and soaked in distilled water for 12 h. at room temperature. The crude extracts were filtered using a Whatman No.1. filter paper and these leaf and rhizome extracts were used for subsequent experiments.

2. Leaf and rhizome extracts of *T. angustifolia* L. on seed bioassays

Bioassays on seed germination and seedling growth of giant mimosa were performed. Seeds were placed on sieve on the containers with the extract at various concentrations (25, 50, 75 and 100 g/l). As for control, distilled water was used. 25 ml of each treatment was pipetted into the containers with 50 seeds of giant mimosa for 7 days. The experiment was conducted with 5 replicates for each treatment. The percentage of seed germination was calculated, and seedling growth was measured as shoot and root lengths.

3. MDA content

Root of giant mimosa was used in MDA content analysis by method of Veligova *et al.* (2000). 0.5 g root was homogenized with liquid nitrogen, 5 ml 0.1% w/v tricholoacetic acid (TCA) and centrifuged at 14,000 rpm for 20 min. After centrifugation, 1 ml of top solution was mixed with 2 ml 0.5 % w/v TBA in 20 % TCA and incubated at 95^{o}C for 30 min. After that, the mixture was dipped into ice to stop the reaction and centrifuged at 10,000 rpm. for 30 min. Measured wavelengths at 532 and 600 nm.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Seed germination

The results indicated that leaf and rhizome extracts of *T. angustifolia* L. at all concentrations did not reduce the percentage of seed germination of giant mimosa, compared to that of distilled water (Table 1). This result was inconsistent with Sethuraman and Sanjayan (2013) who demonstrated that the aqueous extract of the inflorescence largely reduced germination of *Vigna mungo* L. (48%) and Yongvanich and Chulaluksananukul (1997) who showed that condensed tannins from *T. angustifolia* L. extract reduced seed germination of giant mimosa.

2. Seedling growth

The percentage of shoot length compared to the control in the treatment of rhizome and leaf extracts of *T. angustifolia* L. at all concentrations of the rhizome extracts reduced the percentage of shoot length of giant mimosa better than the leaf extract (Table 1). The inhibition became more effective with increasing the concentrations. Rhizome extract at concentration of 100 g/l showed the maximum reduction of 21.59% of shoot length. Similarly, the rhizome extract inhibited the percentage of root length of giant mimosa better than the leaf extract. Rhizome extract at concentration of 100 g/l showed the maximum reduction of 10.07% of root length (Table 1 and Figure 1). The results were in accordance with Gallardo *et al.* (2001) who showed that *T. angustifolia* L. had a strong allelopathic effect on growth inhibition of *Salvinia minima* Baker. and the aqueous extract of the rhizome reduced root length of *Vigna mungo* L. 26.94% (Sethuraman and Sanjayan, 2013)

3. MDA content

Both extracts did not affect the MDA content, indicating no lipid peroxidation (Figure 2). This result was similar with previous studies (Wichaidist, 2012). The evidence suggested that rice straw extracts had no effect on lipid peroxidation of giant mimosa because phenolic compound phytotoxic substances were presented in the *T. angustifolia* L. and rice straw extracts (Kuwatsuka and Shindo, 1973) did not affect lipid peroxidation.

CONCLUSION

In conclusion, leaf and rhizome extract of *T. angustifolia* L. did not inhibit seed germination but they restricted seedling growth of giant mimosa. The rhizome extract reduced seedling growth of giant mimosa more than the leaf extract. The Both extracts did not affect MDA content, indicating no lipid peroxidation of giant mimosa.

Table 1 Bioassay of leaf and rhizome extracts of *Typha angustifolia* L. on seed germination and seedling growth of giant mimosa

Conc. (g/l)	rhizome extract			leaf extract		
	% of control					
	germination	root length	shoot length	germination	root length	shoot length
0	100 [ns]	100a	100a	100 [ns]	100a	100a
25	100	27.61b	43.18b	100	64.51b	77.78b
50	100	16.04c	27.27bc	100	50.32c	65.22c
75	100	14.18c	30.11bc	100	27.96d	53.14d
100	100	10.07d	21.59d	100	27.42d	38.65d

[ns] Values in the column are not significantly differences ($p<0.05$)

Different letters within the same column indicate significance differences ($p<0.05$) between treatments by Tukey's test.

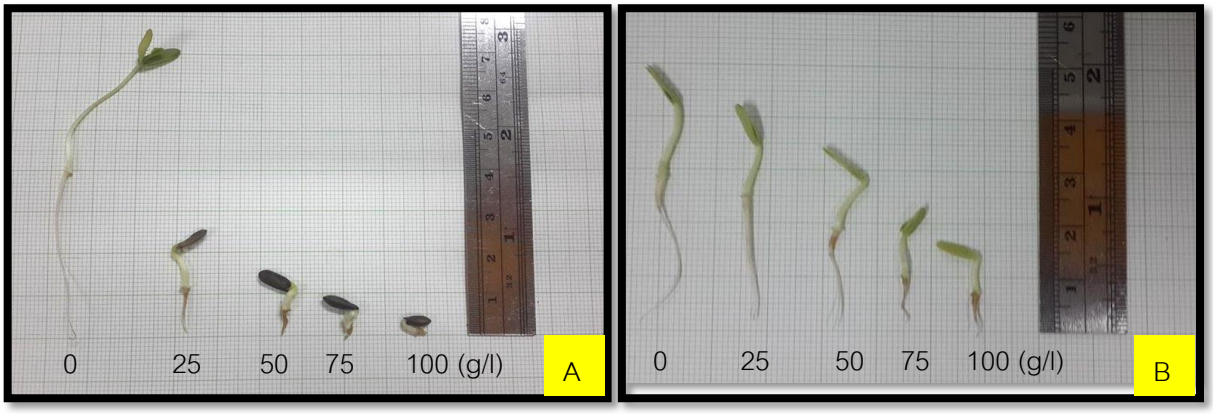


Figure 1 Effects of rhizome (A) and leaf (B) extracts of *Typha angustifolia* L. on seedling growth of giant mimosa

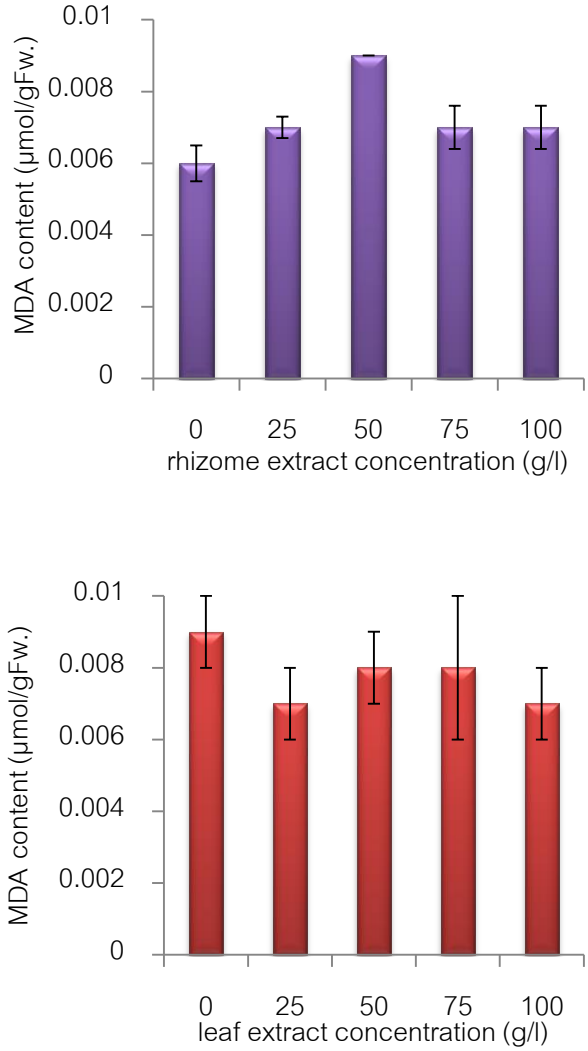


Figure 2 MDA content of rhizome and leaf extract of *Typha angustifolia* L. on root of giant mimosa.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Development and Promotion of Science and Technology Talents Project (DPST) and Kasetsart University. I thank my advisor, Assoc. Professor Dr. Srisom Suwanwong and co- advisor, Dr. Ornusa Khamsuk for guidance.

REFERENCES

Bakar, B., S.T. Leong, M.R. Othman, M. Annuar and K. Awang. 2013. Allelochemicals in *Cuscuta campestris* Yuncker, pp.16-22. *In* **The4th Tropical Weed Science Conference.** 23-25 January 2013, Chiang Mai, Thailand.

Gallardo-Williams, M.T., C.L. Geiger, J.A. Pidala and D.F. Maritin. 2001. Essential fatty acids and phenolic acids from extracts and leachates of southern cattail (*Typha domingensis* P.). **Phytochemistry** 59: 305-308.

Jarchow, M.E. and B.I. Cook. 2009. Allelopathic as mechanism for the invasion of *Typha angustifolia* L.. **Plant Ecol** 204: 113-124.

Kuwatsuku, S. and H. Shindo. 1973. Behavior of phenolic substances in the decaying process of plants: I. Identification and Quantitative Determination of Phenolic Acids in Rice Straw and Its Decayed Product by Gas Chromatography. **Soil Science and Plant Nutrition** 19: 219-227.

Londonkar, R.L., U.M.Kattegouga, K. Shivsharnappa and J.V. Hanchinalmath. 2013. Phytochemical screening and in vitro antimicrobial activity of *Typha angustifolia* Linn. leaves extract against pathogenetic gram negative micro organisms. **Pharmacy Research** 6: 280-283.

Rice, E.L. 1984. **Allelopathy**. 2nd Edition. Academic Press, New York.

Sethuraman, A. and K.P. Sanjayan. 2013. Bio-herbicidal effect of Typha angustifolia L. extracts on seed germination and seeding growth of Vigna mungo (L.) Hepper. **Internation Journal of Biosience Research** 5: 1-6.

Shode, F.O., A.S. Mahomed and C.B. Roger. 2002. Typhaphthalide and typharin, two phenolic compounds from *Typha capensis*. **Phytochemistry** 61: 955-957.

Velikova, V., I. Yordanov and A. Edreva. 2000. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants protective role of exogenous polyamine. **Plant Science** 151: 59-66.

Wichaidist, B.. 2012. **Effects of Rice Straw Extracts on Some Physiological Process in Some Plants.** M.E. Thesis, Kasetsart University.

Yongvanich, T. and W. Chulaluksananukul. 1997. **Allelopathic of *Typha angustifolia* L. on Seedling Growth of *Mimosa pigra* L.**. Chulalorngkorn, Bankok.

การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Preparation and Characterization of VN Thin Films Deposited by Reactive DC Magnetron Sputtering Method

จงรัก บ่อทรัพย์[1] สุรสิงห์ ไชยคุณ[1] และ นิรันดร์ วิทิตอนันต์[1*]

Jongrak Borsup[1], Surasing Chaikhun[1] and Nirun Witit-anun[1*]

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ (VN) ถูกเคลือบด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่อโครงสร้างของฟิล์มที่เคลือบได้ โครงสร้างผลึก ความหนา ความหยาบผิว ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มถูกศึกษาด้วยเทคนิค XRD, AFM, FE-SEM และ EDS ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ คือ วาเนเดียมไนไตรด์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ fcc ระนาบ (111), (200) และ (220) โดยขนาดผลึกและค่าคงที่แลตทิซมีค่าในช่วง 14.3 – 30.2 nm และ 4.121 – 4.170 Å ตามลำดับ ความหนาของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ส่วนความหยาบผิวมีค่าอยู่ในช่วง 0.7-9.3 nm ผลการวิเคราะห์ด้วย FE-SEM แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างแบบคอลัมนาร์ โดยผิวหน้าของฟิล์มมีลักษณะแตกต่างกันเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่เคลือบได้มีวาเนเดียมและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งแปรค่าตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน

ABSTRACT

Vanadium nitride (VN) thin films were deposited by reactive DC magnetron sputtering method. The effect of N_2 gas flow rate on the structure of the as-deposited films was investigated. The crystal structure, thickness, roughness, surface morphology and chemical composition were characterized by XRD, AFM, FE-SEM and EDS, respectively. The results showed that the as-deposited film was fcc vanadium nitride with (111), (200) and (220) plane. The crystallite size and lattice constant were in range of 14.3 – 30.2 nm and 4.121 – 4.170 Å, respectively. The thickness decreased with increasing of N_2 gas flow rate and roughness surface in range of 0.7 - 9.3 nm. FE-SEM analysis showed compact columnar structure and different morphology with increasing of the N_2 gas flow rate. The as-deposited films compose of vanadium and nitrogen in different composition varied with the N_2 gas flow rate.

Keywords: thin film; vanadium nitride; N_2 gas flow rate; reactive DC magnetron sputtering

*Corresponding author; e-mail address: nirun@buu.ac.th

[1]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131.

[1]Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 20131.

คำนำ

ปัจจุบันการปรับปรุงผิววัสดุโดยการเคลือบเพื่อให้มีสมบัติตามต้องการ เช่น เพิ่มความแข็งทนการขูดขีด หรือต้านทานการกัดกร่อน หรือทนความร้อนสูง ตลอดจนมีสีสันสวยงาม ฯลฯ กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก ทั้งจากกลุ่มวิจัยและภาคอุตสาหกรรม ทั้งนี้การเคลือบด้วยไอกายภาพ (Physical Vapor Deposition ; PVD) เป็นวิธีการเคลือบที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถเคลือบวัสดุได้ทั้งที่เป็นโลหะหรืออโลหะ ชั้นเคลือบหรือฟิล์มบางที่ได้อาจเป็นสารเดียวหรือสารประกอบก็ได้ โดยมีการนำมาใช้เคลือบวัสดุหลายด้าน เช่น การเคลือบสวยงาม (Decorative Coating) การเคลือบแสง (Optical Coating) และการเคลือบแข็ง (Hard Coating) ฯลฯ แต่งานวิจัยนี้เน้นทางด้านการเคลือบแข็งเนื่องจากเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ซึ่งเป็นการยืดอายุการใช้งาน ทั้งนี้การเคลือบแข็งส่วนมากเป็นชั้นเคลือบของโลหะทรานซิชันไนไตรด์ ได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เซอร์โคเนียมไนไตรด์ (ZrN) และโครเมียมไนไตรด์ (CrN) ฟิล์มกลุ่มนี้มีสมบัติเด่นหลายด้าน เช่น มีความแข็งสูง ทนการขัดสีและกัดกร่อน นำไฟฟ้าดี จุดหลอมเหลวสูง มีความเสถียรทางเคมีและความร้อนดี (Lim et al., 2000; Shi et al., 2013) จึงมีการนำฟิล์มไปใช้งานอย่างกว้างขวาง

ฟิล์มบางโลหะทรานซิชันไนไตรด์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ คือ ฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายด้าน เช่น มีความแข็งมาก มีจุดหลอมเหลวสูง ต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนได้ดี นำไฟฟ้าดีที่อุณหภูมิสูง มีสมบัติไตรบอโลยีที่ดี มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำเมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูง และเป็นสารประกอบทนไฟ (Refractory Compound) ที่มีอุณหภูมิทรานสิชัน (transition temperature) ในช่วง 2 ถึง 9 K (Liu et al., 2014) ปกติวาเนเดียมไนไตรด์มีเฟสที่เสถียร 2 เฟส คือ เฮกซะโกนอล β-V_2N และ คิวบิค δ-VN (Massalski, 1991) จากสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีเยี่ยมนี้ทำให้มีการนำวาเนเดียมไนไตรด์ไปใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโตรดของแบตเตอรีและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Choi et al., 2006)

การเตรียมฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การระเหยด้วยเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulsed Laser Ablation) (D'Anna et al., 2002) การระเหยแบบรีแอคตีฟด้วยลำอิเล็กตรอน (Reactive Electron Beam Evaporation) (Wiklun et al., 2006) และการเคลือบด้วยวิธีรีแอคตีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Reactive Magnetron Sputtering) (Glaser et al., 2007) แต่การเคลือบด้วยวิธีรีแอคตีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงได้รับความสนใจมากที่สุด เนื่องจากสามารถเคลือบฟิล์มบางได้ที่อุณหภูมิห้อง ไม่ใช้ความร้อนขณะเคลือบ และการให้ศักย์ไบแอสแก่ชิ้นงาน ขั้นตอนการเคลือบไม่ยุ่งยากและสามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการเคลือบ เช่น อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน กระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความดันที่ใช้ขณะเคลือบ เวลาที่ใช้ในการเคลือบ ฯลฯ

ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง เช่น โครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาคลักษณะพื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี ความหนา หรือความหยาบผิวล้วนมีอิทธิพลต่อสมบัติของฟิล์มบางที่เคลือบได้โดยลักษณะเฉพาะต่าง ๆ เหล่านี้ของฟิล์มจะขึ้นกับเงื่อนไขการเคลือบเป็นสำคัญ ดังนั้นการเข้าใจผลของเงื่อนไขการเคลือบต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของฟิล์มที่เคลือบได้จึงยังคงมีความสำคัญและจำเป็นในการศึกษาต่อไป บทความวิจัยนี้จึงรายงานผลการเตรียมฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงบนกระจกสไลด์และซิลิกอนที่อุณหภูมิห้องเพื่อศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่อโครงสร้างผลึก ความหนา ลักษณะพื้นผิว โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มที่เตรียมได้

อุปกรณ์และวิธีการ

ฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ในงานนี้เตรียมด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงจากเครื่องเคลือบในสุญญากาศ (Figure 1) ซึ่งมีห้องเคลือบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 31.0 cm สูง 31.0 cm ติดเป้าสารเคลือบ (วาเนเดียม) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5.0 cm พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง การเคลือบใช้แก๊สอาร์กอน (99.999%) เป็นแก๊สสปัตเตอร์ และ แก๊สไนโตรเจน (99.995%) เป็นแก๊สไวปฏิกิริยา โดยจ่ายแก๊สผ่านเครื่องควบคุมอัตราไหลมวลของ MKS รุ่น type247D สำหรับเครื่องสูบสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบแบบแพร่ไอและเครื่องสูบกลโรตารีเป็นเครื่องสูบท้าย ใช้ชุดมาตรวัดความดันของ PFEIFFER ซึ่งประกอบด้วยมาตรวัดความดันชนิด Compact Full Range Gauage รุ่น PKR251 และส่วนแสดงผลรุ่น TPG262

การเคลือบเริ่มจากนำวัสดุรองรับได้แก่ กระจกสไลด์และแผ่นซิลิกอน เข้าห้องเคลือบแล้วลดความดันในห้องเคลือบให้เท่ากับ 5.0×10^{-5} mbar ให้เป็นความดันพื้น จากนั้นปล่อยแก๊สที่ใช้เข้าห้องเคลือบ โดยกำหนดให้อัตราไหลแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 20.0 sccm และแปรค่าอัตราแก๊สไนโตรเจนในช่วง 2.0 – 8.0 sccm การเคลือบควบคุมให้ความดันรวมขณะเคลือบคงที่เท่ากับ 5.0×10^{-3} mbar และกำหนดให้กระแสไฟฟ้าของเป้าวาเนเดียมมีค่าคงที่เท่ากับ 300 mA ทั้งนี้ฟิล์มแต่ละชุดใช้เวลาการเคลือบนาน 60 นาที สำหรับเงื่อนไขการเคลือบสรุปใน Table 1

ทั้งนี้ลักษณะเฉพาะต่างๆของฟิล์มที่เคลือบได้ศึกษาด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้ ได้แก่ (1) โครงสร้างผลึกศึกษาด้วยเทคนิค XRD (Bruker รุ่น D8) ตรวจวัดแบบ 2θ-scan ด้วยมุมตกกระทบเฉียง 2^{O} ในช่วง 20^{O} - 80^{O} (2) ขนาดผลึก คำนวณจากสมการของ Scherrer (3) ลักษณะพื้นผิวและความหยาบผิว ศึกษาด้วยเทคนิค AFM (SEIKO Instrument รุ่น SPA400) (4) ลักษณะพื้นผิว ความหนา และโครงสร้างจุลภาค ศึกษาด้วยเทคนิค FE-SEM (Hitashi รุ่น s4700) และ (5) องค์ประกอบธาตุของฟิล์ม ศึกษาด้วยเทคนิค EDS (EDAX ซึ่งต่อพ่วงอยู่กับกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ของ LEO รุ่น1450VP)

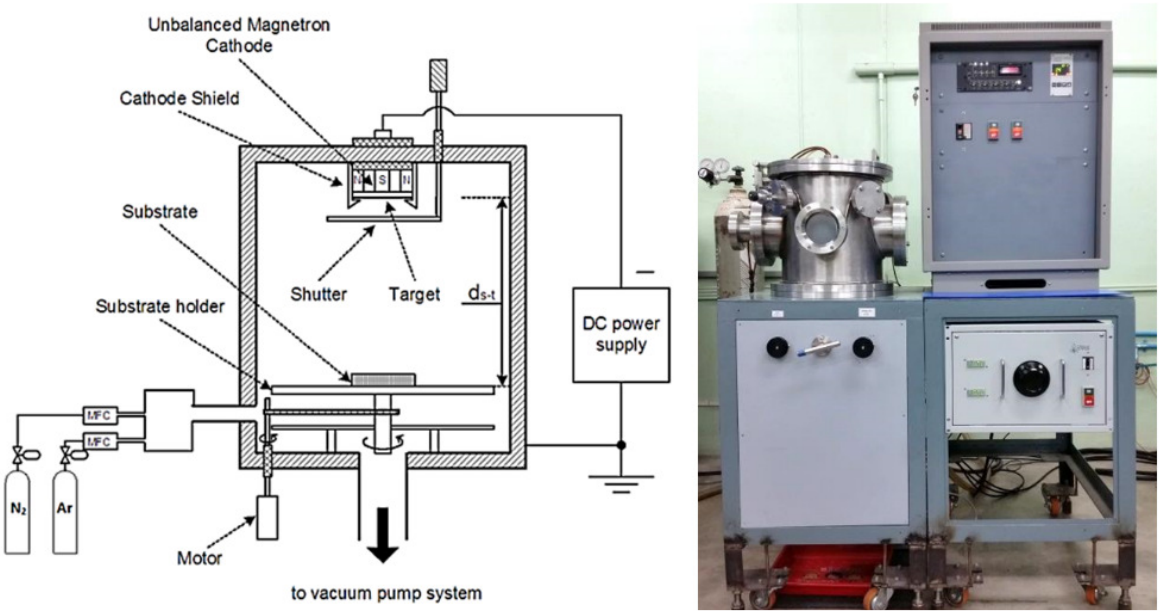


Figure 1 Diagram of DC magnetron sputtering system in experiment.

Table 1 Thin film deposition conditions.

Deposition parameter	Values
Target	Vanadium (V) pure 99.97%
Substrate	Cover Slide, Silicon
The target to substrate distance	10 cm
Base pressure	5.0×10^{-5} mbar
Working pressure	5.0×10^{-3} mbar
The flow rate of Ar gas	20.0 sccm
The flow rate of N_2 gas	2.0, 4.0, 6.0, 8.0 sccm
Vanadium sputtering current	300 mA
Deposition of time	60 min

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบบนกระจกสไลด์ทั้งหมดมีลักษณะเรียบ สะท้อนแสงได้ดี ฟิล์มมีสีน้ำตาลเข้ม สีน้ำตาลและสีน้ำตาลอ่อนเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น (Figure 2) สำหรับอัตราเคลือบฟิล์มซึ่งคำนวณจากความหนาของฟิล์มหารด้วยเวลาในการเคลือบ แสดงใน Figure 3 พบว่าที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2.0 sccm อัตราเคลือบมีค่าเท่ากับ 7.4 nm/min และมีค่าลดลงเป็น 4.6 nm/min ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 8.0 sccm เนื่องจากการเพิ่มอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนจะทำให้ปริมาณอะตอมของไนโตรเจนในห้องเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงค่าหนึ่งซึ่งมากเกินพอสำหรับใช้ในการทำปฏิกิริยากับอะตอมของวาเนเดียมเพื่อฟอร์มตัวเป็นวาเนเดียมไนไตรด์เคลือบบนผิววัสดุรองรับ โดยอะตอมของไนโตรเจนส่วนเกินจะทำปฏิกิริยากับอะตอมของวาเนเดียมที่หน้าเป้าสารเคลือบ จนเกิดเป็นชั้นบาง ๆ ของสารประกอบไนไตรด์ (เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า target poisoning) ซึ่งส่งผลให้เป้าสารเคลือบ (เวเนเดียม) ถูกสปัตเตอร์ได้ยากขึ้น ทำให้ความหนาของฟิล์มวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบบนผิวหน้าของวัสดุรองรับในหนึ่งหน่วยเวลา (อัตราเคลือบ) ลดลงตามไปด้วย

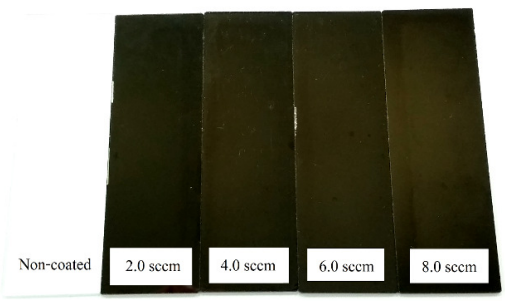


Figure 2 Color of thin films deposited on glass slides with different N_2 gas flow rate.

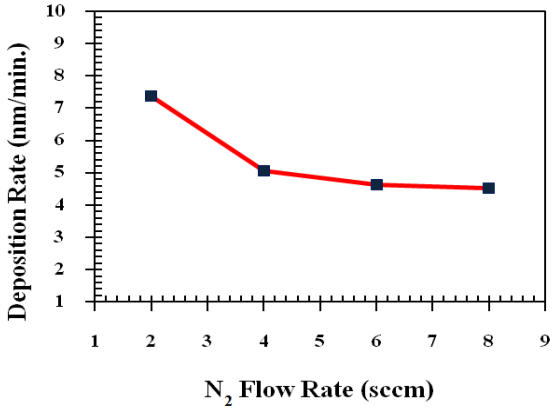


Figure 3 Deposition rate of the films with different N_2 gas flow rate.

Figure 4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของฟิล์มที่เคลือบได้ เมื่อแปรค่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เคลือบได้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ โดยฟิล์มที่เคลือบได้เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2.0 sccm พบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 37.79^{O}, 43.90^{O} และ 63.89^{O} สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบวาเนเดียมไนไตรด์ ระนาบ (111), (200) และ (220) ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 35-0768 เมื่อเพิ่มอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนขึ้นเป็น 4.0 sccm พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (111) ลดลงและหายไปเมื่อเพิ่มอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน ในทางกลับกันที่ระนาบ (200) พบความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นและพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (220) ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2 sccm จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

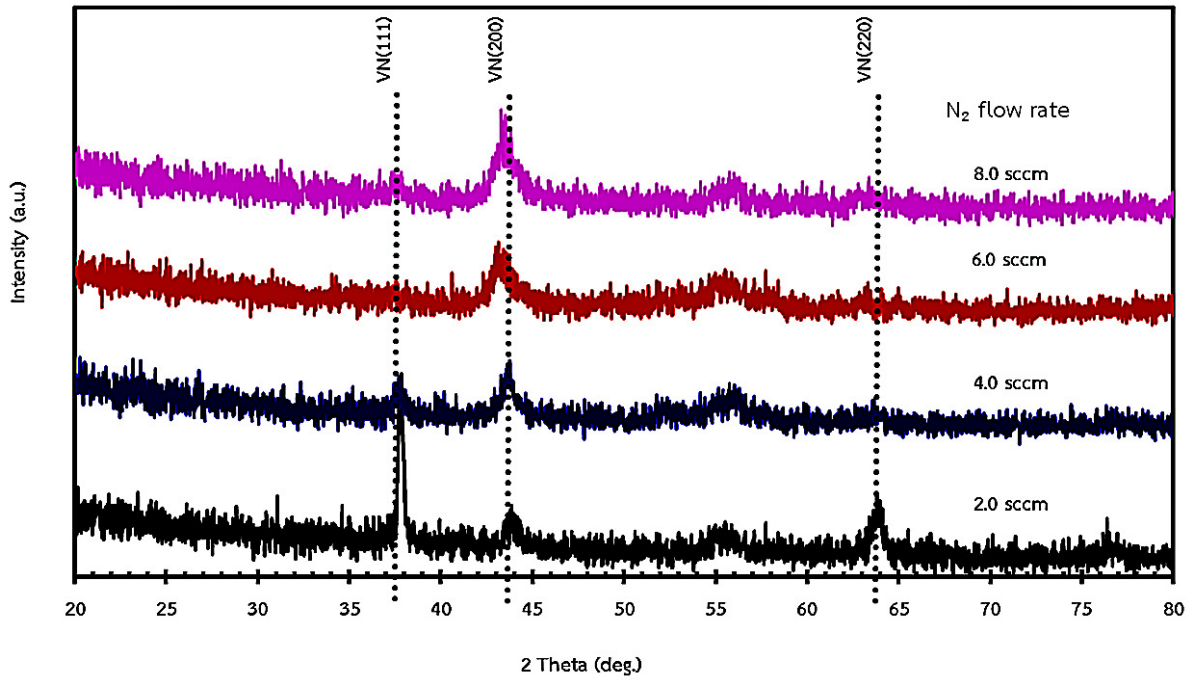


Figure 4 XRD patterns of VN thin films with different N_2 gas flow rate.

ความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าลดลงตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น โดยความหนาของฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าลดลงจาก 443 nm เป็น 271 nm ส่วนความหยาบผิวของฟิล์มมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.3 nm ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2 sccm (Table 2) เนื่องจากเมื่อใช้อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่ำอะตอมของสารเคลือบ (วาเนเดียม) ทำปฏิกิริยากับอะตอมของไนโตรเจนแล้ว ฟอร์มตัวเป็นวาเนเดียมไนไตรด์สะสมพอกพูนอย่างรวดเร็วบนผิวหน้าวัสดุรองรับทำให้ฟิล์มที่ได้มีความหยาบผิวสูง

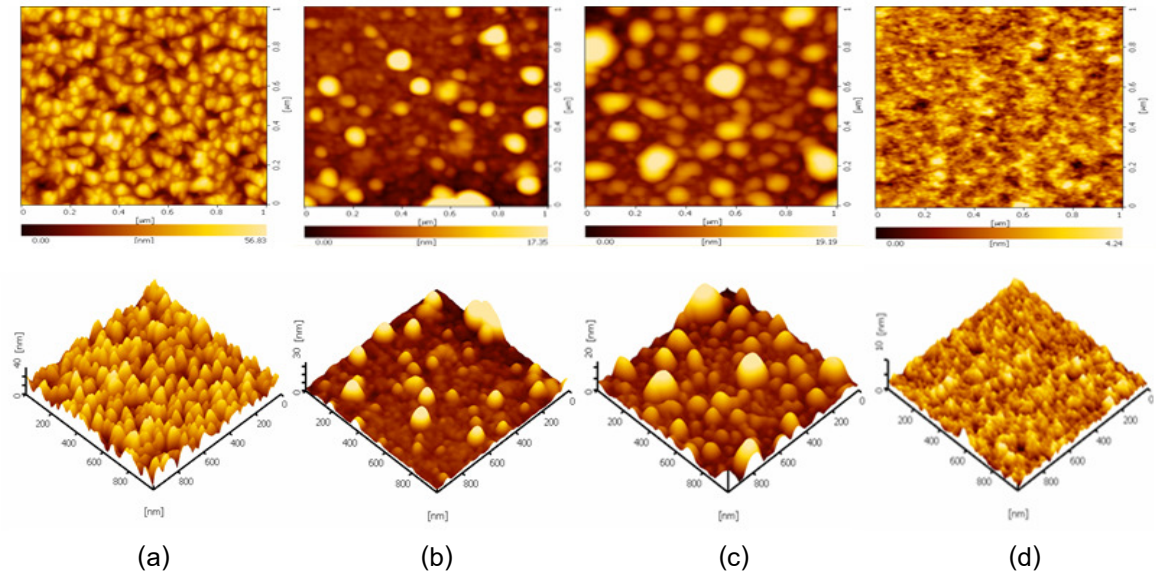
สำหรับขนาดผลึกของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบได้ ซึ่งคำนวณจากสมการของ Scherrer ในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ขนาดผลึกมีค่าลดลง จาก 30.2 nm เป็น 14.3 nm ส่วนค่าคงที่แลตทิซของฟิล์มที่เคลือบได้พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 4.121 – 4.170 Å ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่แลตทิซของสารประกอบวาเนเดียมไนไตรด์ ตามฐานข้อมูล JCPDS เลขที่ 35-0768 (มีค่าเท่ากับ 4.139 Å)

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้สามารถเตรียมฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ได้ที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้องค์ประกอบธาตุของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบของธาตุวาเนเดียม (V) และไนโตรเจน (N) แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของวาเนเดียมต่อไนโตรเจน (V:N) ของฟิล์มที่ได้ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.6 ทุกเงื่อนไขการเคลือบ แสดงว่าฟิล์มที่เคลือบได้เป็นแบบ non-stoichiometry (Table 2)

Table 2 Thickness, roughness, crystal size, lattice constants and elemental composition of the films

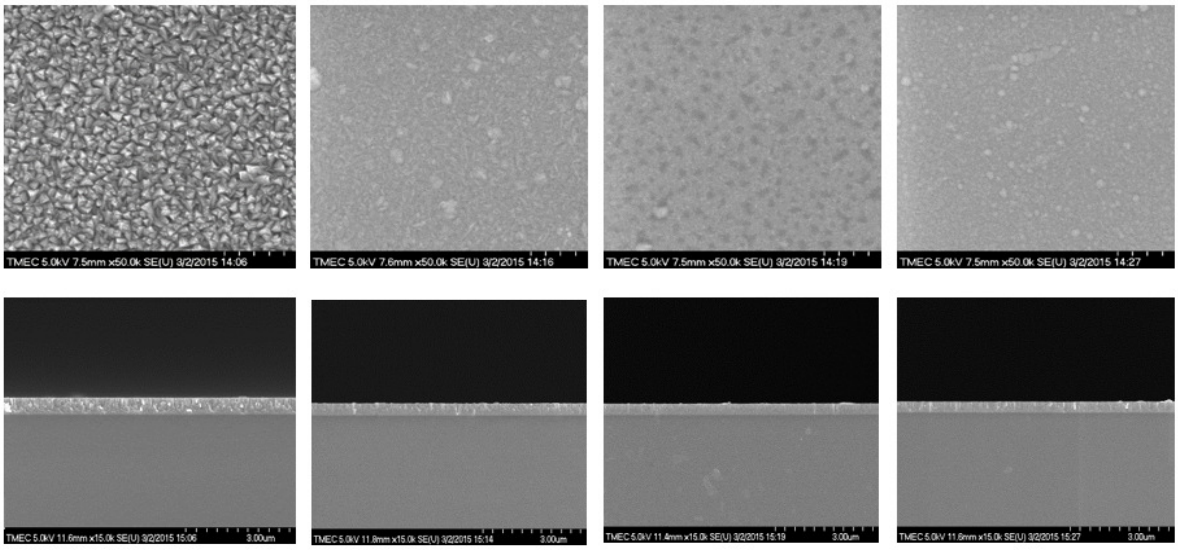
N2 gas flow rate (sccm)	Thickness (nm)	Roughness (nm)	Crystal size (nm)	Lattice Constance (Å)	Elemental composition (At%)		
					V	N	V:N
2.0	443	9.3	30.2	4.121	39.04	60.96	0.6
4.0	304	3.7	28.5	4.141	37.92	62.08	0.6
6.0	278	3.8	15.3	4.170	36.34	63.66	0.6
8.0	271	0.7	14.3	4.155	36.09	63.91	0.6

Figure 5 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบได้จากเทคนิค AFM พบว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่ำ (2.0 sccm) อะตอมของสารเคลือบที่ฟอร์มตัวเป็นชั้นของฟิล์มมีลักษณะเป็นทรงปิรามิดที่มียอดแหลมสูงและร่องลึกกระจายทั่วผิวหน้าฟิล์มทำให้ฟิล์มมีความหยาบผิวสูง (9.3 nm) ส่วนฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนสูง (8.0 sccm) พบว่าสารเคลือบมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กกระจายทั่วผิวหน้าของฟิล์มทำให้ความหยาบผิวมีค่าต่ำที่สุด (0.7 nm)



(a) (b) (c) (d)

Figure 5 AFM micrographs of VN thin films with different N_2 gas flow rate.
(a) 2.0 sccm, (b) 4.0 sccm, (c) 6.0 sccm, (d) 8.0 sccm



(a) (b) (c) (d)

Figure 6 FE-SEM micrographs of VN thin films with different N_2 gas flow rate.
(a) 2.0 sccm, (b) 4.0 sccm, (c) 6.0 sccm, (d) 8.0 sccm

สำหรับโครงสร้างจุลภาคและภาคตัดขวางของฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ จากการศึกษาด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าโครงสร้าง เกรนและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เคลือบได้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจน (Figure 6) โดยเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2.0 sccm เกรนของฟิล์มมีลักษณะเป็นเหลี่ยมกระจายทั่วผิวหน้าของฟิล์ม ขณะที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 4.0 sccm เกรนของฟิล์มมีลักษณะค่อนข้างกลมขนาดเล็กและขนาดใหญ่กระจายอย่างไม่สม่ำเสมอ ที่อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 6.0 sccm พบว่าเกรนของฟิล์มมีลักษณะเป็นเหลี่ยมขรุขระ และสุดท้ายเมื่ออัตราแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 8.0 sccm เกรนของฟิล์มมีลักษณะเป็นเม็ดกลมกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าฟิล์ม สำหรับภาคตัดขวางฟิล์มที่เคลือบได้พบว่าฟิล์มมีโครงสร้างแบบคอลัมนาร์และความหนาของฟิล์มมากสุดเท่ากับ 443 nm ที่อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 2 sccm และความหนาน้อยสุดเท่ากับ 271 nm เมื่ออัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 8 sccm

สรุป

ฟิล์มบางวาเนเดียมไนไตรด์ถูกเคลือบบนซิลิกอนด้วยวิธีรีแอคตีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อุณหภูมิห้องพบว่า เมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้นเท่ากับ 2 sccm, 4 sccm, 6 sccm และ 8 sccm ฟิล์มที่เคลือบได้มีสีของฟิล์มเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้ม สีน้ำตาลและสีน้ำตาลอ่อน ตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนที่เพิ่มมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าฟิล์มวาเนเดียมไนไตรด์ที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบ fcc ระนาบ (111), (200) และ (220) โดยความหนาและขนาดผลึกมีค่าลดลงเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น สำหรับลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM พบว่าฟิล์มมีโครงสร้างแบบคอลัมนาร์และมีลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแตกต่างกันเมื่ออัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่างกัน จากเทคนิค EDS พบว่าองค์ประกอบของธาตุวาเนเดียมและไนโตรเจนแปรค่าตามอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนของหนึ่งงานวิจัยซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก งบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (รหัสโครงการ 177561 / สัญญาเลขที่ 70/2558)

เอกสารอ้างอิง

Choi, D., G.E. Blomgre and P.N. Kumta. 2006. Fast and Reversible Surface Redox Reaction in Nanocrystalline Vanadium Nitride Supercapacitors. **Advanced Materials** 18: 1178-1182.

D'Anna, E., A.D. Cristoforo, M. Fernández, G. Leggieri, A. Luches, G. Majni, P. Mengucci and L. Nanai. 2002. Excimer laser reactive deposition of vanadium nitride thin films. **Applied Surface science** 186: 496-501.

Glaser, A., S. Surnev, F.P. Netzer, N. Fateh, G.A. Fontalvo and C. Mitterer. 2007. Oxidation of vanadium nitride and titanium nitride coating. **Surface Science** 601: 1153-1159.

Lim, J.W., J.S. Park and S.W. Kang. 2000. Kinetic Modeling of Film Growth Rates of TiN Films in Atomic Layer Deposition. **Journal of Applied Physics** 87: 4632-4634.

Liu, X., L. Huibin, H. Meng, J. Kuijuan, Y. Guozhen, N. Hao and Z. Kun. 2014. Epitaxial Growth of Vanadium Nitride Thin Films by Laser Molecule Beam Epitaxy. **Materials Letters** 123: 38–40.

Massalski, T.B. 1991. **Binary Alloy Phase Diagrams**. Ohio, ASM Metals Park.

Shi, P.Z., J. Wang, C.X. Tian, Z.G. Li, G.D. Zhang, D.J. Fu and B. Yang. 2013. Structure, Mechanical and Tribological Properties of CrN Thick Coatings Deposited by Circular Combined Tubular Arc Ion Plating. **Surface and Coatings Technology** 288 :S534-S537.

Wiklund, U., B. Casas and N. Stavlid. 2006. Evaporated Vanadium Nitride as a Friction Material in Dry Sliding Against Stainless Steel. **Wear** 261: 2–8.

การทดลองอย่างง่ายสำหรับสาธิตแสงเขียววาบในบรรยากาศ

A Simple Experiment for Demonstration of Green Flash in Atmosphere

มยุรัตน์ ตั้งวิชัย[1] กัลยารักษ์ รักษ์ผล[1] และ มยุรี หาญสุภานุสรณ์[1*]

Mayurut Tungwichai[1] , Kunyaruk Rukphol[1] and Mayuree Hansupanusorn[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ทดลองอย่างง่ายเพื่อสาธิตให้เห็นปรากฏการณ์แสงเขียววาบ ระบบทางแสง ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงแอลอีดีฉายแสงขาว ที่วางด้านหลังภาชนะรูปทรงสามเหลี่ยมบรรจุสารละลายคอลลอยด์ความเข้มข้นค่าต่างๆ และหมุนปรับมุมได้ สเปกตรัมแสงถูกบันทึกภาพโดยใช้กล้องถ่ายรูปโทรศัพท์มือถือที่ติดตั้งแผ่นเกรตติงด้านหน้ากล้องทำหน้าที่แยกสเปกตรัมแสงสีต่างๆ พบว่าการใช้ภาชนะทรงสามเหลี่ยมและเกรตติงทำหน้าที่เป็นปริซึมสเปกโตรมิเตอร์ทำให้เห็นปรากฏการณ์นี้ได้ดี ภาชนะรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า มุมยอด 60 องศา ที่มุมตกกระทบของแสงที่ด้านข้างภาชนะ 45 – 65 องศา โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นสารละลายคอลลอยด์ 0.20-0.3 %V/V เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการจำลองเกิดปรากฏการณ์แสงเขียบวาบในห้องปฏิบัติการครั้งนี้

ABSTRACT

This research designed a simple experiment for green flash demonstration. The optical system consisted of an LED light source placed behind the home-made triangular container filled with various concentration of colloidal solutions. The incident angle of LED light can be adjusted. The color and light spectrum was recorded by a telephone camera which was placed behind a grating. It was found that a grating and a water-filled triangular container acted like parts of a prism spectrometer. The results showed that water prism with a 60º angle with light incident angle of 45-65º and concentration of milk 0.2-0.3 %V/V in water are the optimum conditions to demonstrate the green-flash phenomena.

Key Words: green flash, refractive properties, scattering properties

* Corresponding author; e-mail address: mayuree.kit@kmutt.ac.th

[1]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[1]Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

คำนำ

ปรากฏการณ์ที่เห็นสีของท้องฟ้าเนื่องมาจากการกระเจิงของแสงจากดวงอาทิตย์ที่มีหลายความยาวคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศตกกระทบสิ่งกีดขวางที่มีขนาดใกล้เคียงความยาวคลื่นแสงเข้าสู่ตา จากสมการการกระเจิงแสงของเรย์เลห์ (Rayleigh scattering) ความเข้มของการกระเจิงแสงจะแปรผกผันกับความยาวคลื่นแสงยกกำลังสี่ แสงสีน้ำเงินมีความยาวคลื่นสั้น แสงสีแดงมีความยาวคลื่นยาวกว่า แสงสีน้ำเงินจึงกระเจิงได้ดีกว่าแสงสีอื่นๆมาก นอกจากนั้นตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และขนาดของอนุภาคสิ่งกีดขวางในชั้นบรรยากาศก็มีผลต่อการมองเห็นสี

กลางวันดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่งเหนือศีรษะ แสงขาวเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศด้านบนมายังพื้นโลกมีระยะทางสั้นกว่าช่างเวลาเช้าและเย็น แสงสีน้ำเงินจากดวงอาทิตย์กระเจิงแสงได้ดีกว่ามากเราจึงเห็นท้องฟ้าเป็นสีฟ้า ส่วนในเวลาเช้าและเย็นตำแหน่งของดวงอาทิตย์ขนานกับพื้นโลก แสงขาวเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศมีระยะทางยาวกว่ากลางวัน แสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่นสั้นซึ่งกระเจิงได้ดีที่สุดจึงกระเจิงไปหมดก่อน เราจึงมองไม่เห็นท้องฟ้าเป็นสีฟ้าในเวลาเย็น เห็นแต่แสงสีส้มแดงซึ่งมีความยาวคลื่นยาวกว่าและกระเจิงแสงน้อยกว่าเดินทางเข้าสู่ตา เป็นผลทำให้มองเห็นท้องฟ้าเป็นสีส้มแดงในเวลาเย็น ส่วนขนาดของอนุภาคสิ่งกีดขวางในชั้นบรรยากาศก็มีผลต่อการมองเห็นสี เนื่องจากบรรยากาศแต่ละชั้นจะพบอนุภาคสารแขวนลอยที่มีขนาดต่างกัน บรรยากาศชั้นล่างใกล้พื้นโลก ประกอบด้วยไอน้ำและฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ แสงความยาวคลื่นสั้นเมื่อตกกระทบอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งกีดขวางกั้นทางเดินแสง แสงความยาวคลื่นสั้นจึงเดินทางมาไม่ถึงตาผู้สังเกต เป็นเหตุให้แสงสีฟ้าหายไป สอดคล้องกับเวลาบ่ายถึงเวลาเย็นแสงจากดวงอาทิตย์เดินทางขนานพื้นโลก อุณหภูมิของอากาศที่พื้นโลกมีอุณหภูมิสูง ทำให้โมเลกุลของไอน้ำและฝุ่นละอองลอยตัวสูงขึ้น ความหนาแน่นของสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่ในชั้นบรรยากาศมากขึ้น แสงสีฟ้าจึงหายไป จึงเห็นแต่ท้องฟ้าเป็นสีส้มแดง

ปรากฏการณ์แสงเขียววาบคือปรากฏการณ์ที่เกิดในขณะที่ดวงอาทิตย์กำลังจะลับเส้นของฟ้าในเวลาเย็นหรือกำลังจะโผล่เหนือเส้นขอบฟ้าในเวลาเช้า ก่อนเกิดแสงเขียววาบสังเกตเห็นดวงอาทิตย์เป็นสีแดง โดยแสงจากดวงอาทิตย์เป็นแสงขาวแต่ความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินมีโอกาสหายไปมากกว่า คงเหลือแต่แสงความยาวคลื่นยาวกว่า คือสีเขียว เหลือง ส้ม แดงตามลำดับ โดยปรากฏการณ์นี้จะเห็นขอบด้านบนของดวงอาทิตย์เป็นแสงสีเขียวเท่านั้น ช่วงเวลานั้นแสงสีเหลือง ส้ม และแดง ที่เรียงอยู่ที่ตำแหน่งด้านล่างถูกบังอยู่ใต้เส้นขอบฟ้า (Figure 1a-b)

Rayleigh, L. (1934) กล่าวถึงปรากฏการณ์แสงเขียววาบว่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่ไม่ได้พบได้บ่อย โดยจะเห็นขอบด้านบนของดวงอาทิตย์เป็นสีเขียวสว่างวาบในช่วงเวลาสั้นๆ สังเกตเห็นได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเมือง ประเทศและตำแหน่งที่ตั้ง สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ จะมองเห็นเฉพาะแสงสีเขียวเท่านั้น เนื่องจากแสงสีน้ำเงินเดินทางมาไม่ถึงตา ส่วนสี เหลือง ส้ม แดง จะถูกบดบังขณะดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ใต้เส้นขอบฟ้า ทั้งนี้ยังมีงานวิจัยไม่มากที่กล่าวถึงการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์นี้ Courtial,J (2012) ได้ออกแบบการทดลองโดยเปรียบเทียบการใช้ตู้ปลาทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและทรงสี่เหลี่ยมคางหมูบรรจุน้ำนมผสมน้ำ ใช้หลอดไฟ LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงและกล้องถ่ายรูปถ่ายภาพแสงซึ่งไม่ค่อยชัดเจนนัก พบว่าเส้นทางเดินของแสงผ่านมุมสามเหลี่ยมของตู้ปลาทรงสี่เหลี่ยมคางหมู มองเห็นการแยกแสงสีเขียวได้ดีกว่าเส้นทางเดินของแสงผ่านตู้ปลาทรงสี่เหลี่ยม จากการทบทวนวรรณกรรมดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะสร้างชุดสาธิตการทดลองเพื่อใช้ในการจำลองการเกิดปรากฏการณ์แสงเขียววาบในห้องปฏิบัติการ สามารถอธิบายเรื่องหักเหของแสง (Refraction) ผ่านรอยต่อตัวกลางอากาศ-ของเหลว การกระเจิงแสง (Scattering) ผ่านสารละลายคอลลอยด์ และการกระจายแสงสีต่างๆในปริซึมของเหลว(Water prism dispersion) ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการจำลองการเกิดปรากฏการณ์ ได้แก่

การศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารคอลลอยด์ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการกระเจิงแสงได้ดี ตำแหน่งมุมตกกระทบของแสงขาวที่เหมาะสม การออกแบบระบบทางแสงเพื่อบันทึกภาพสเปกตรัมทางแสงโดยใช้แผ่นเกรตติงเลี้ยวเบนเพื่อแยกสเปกตรัมแสงได้อย่างชัดเจนร่วมกับการใช้กล้องถ่ายรูปจากโทรศัพท์มือถือ



(a) (b)

Figure 1 Photograph of green flash phenomena in atmosphere.

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. หลอดไฟฉาย LED แสงสีขาว พร้อมขายึดหลอดไฟ
2. กล้องถ่ายรูปโทรศัพท์มือถือ ความละเอียด 8.0 เมกกะพิกเซล พร้อมขาตั้งกล้องโทรศัพท์มือถือ
3. เลนส์นูน (Convex lens) ความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร พร้อมขายึดเลนส์
4. เกรตติง (Grating) จำนวนเส้น 9,126 เส้น/เซนติเมตร
5. กรวยกระดาษทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร สร้างขึ้นเองทำหน้าที่เป็นคอลลิเมเตอร์
6. ช่องเปิดแสงวงกลม (Circular aperture) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 มิลลิเมตร สร้างขึ้นเองทำหน้าที่บังคับแหล่งกำเนิดแสงให้เสมือนเป็นจุด
7. ภาชนะรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ประกอบจากกระจกใสขนาดกว้าง 10 x 10 เซนติเมตร มุมยอด 60 องศา ใช้สำหรับบรรจุสารละลายคอลลอยด์
8. แท่นวางภาชนะรูปทรงสามเหลี่ยมที่มีสเกลสำหรับวัดมุมครึ่งวงกลมที่หมุนตำแหน่งมุมได้
9. ไม้บรรทัด
10. กระดาษกาวสองหน้าชนิดบาง
11. สารละลายคอลลอยด์ (นมผสมน้ำ) ปริมาณความเข้มข้นค่าต่างๆ

การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ชุดสาธิตแสงเขียววาบ

การออกแบบการทดลองเพื่อสาธิตปรากฏการณ์แสงเขียววาบในบรรยากาศด้วยการจำลองในห้องปฏิบัติการทางแสง โดยใช้เกรตติงทำหน้าที่เป็นสเปกโตมิเตอร์อย่างง่ายเพื่อแยกสเปกตรัมของแสง ใช้หลอดไฟฉาย LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงขาว เลนส์นูนทำหน้าให้แสงที่เปล่งออกมาเป็นลำแสงขนาน ออกแบบภาชนะทำจากกระจกใสเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าคล้ายปริซึมบรรจุสารละลายคอลลอยด์ในปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการกระเจิงแสงได้ดี และกล้องถ่ายรูปสำหรับบันทึกภาพสเปกตรัมของแสง ไดอะแกรมการออกแบบและ

การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง (Figure 2) ปรากฏการณ์แสงเขียววาบที่ทำในห้องปฏิบัติการ สเปกตรัมของแสงคลื่นสั้นสีม่วงและสีน้ำเงินจะไม่ปรากฏ เห็นเฉพาะสเปกตรัมของแสงคลื่นยาว สีเขียว เหลือง แดง ตามลำดับโดยเรียงจากซ้ายไปขวา

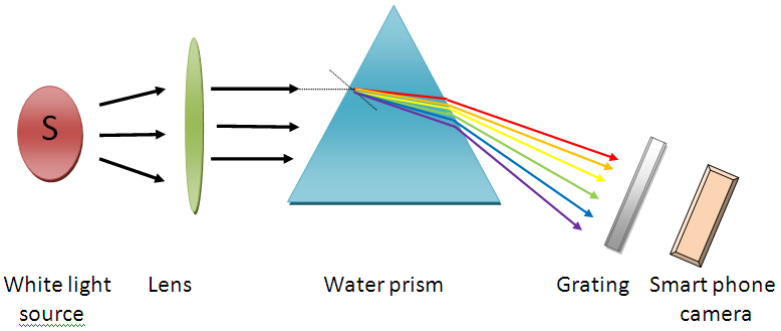


Figure 2 Schematic diagram of an experiment set up.

ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์ที่เหมาะสม

ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์ (น้ำนมผสมน้ำ) ที่เหมาะสม โดยนำภาชนะทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าบรรจุน้ำวางบนแท่นปรับหมุนมุมตกกระทบ ให้แสงตกกระทบด้านข้างตำแหน่งกลางภาชนะทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ปรับปริมาณความเข้มข้นสารละลายคอลลอยด์ในช่วง 0.00 - 1.0 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร (โดยเพิ่มครั้งละ 0.05 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร) จัดให้แสงไฟจากหลอดไฟฉาย LED ผ่านเลนส์นูนความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร อยู่ในแนวระนาบเดียวกับภาชนะทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า ติดตั้งเกรตติงด้วยกระดาษกาวสองหน้าไว้หน้ากล้องถ่ายรูปโทรศัพท์มือถือ ปรับเลื่อนกล้องถ่ายรูปจนกระทั่งเห็นสเปกตรัมของแสงที่ชัดเจนบันทึกภาพสเปกตรัมที่สังเกตเห็น

ศึกษาตำแหน่งมุมตกกระทบของแสงที่ด้านข้างภาชนะที่เหมาะสม

ศึกษาตำแหน่งมุมตกกระทบของแสงที่ด้านข้างภาชนะที่เหมาะสม โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์จากตอนที่แล้วที่ทำให้เห็นปรากฏการณ์แสงเขียววาบได้เหมาะสมที่สุด ติดตั้งชุดการทดลอง (Figure 2) โดยนำภาชนะทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าใส่สารละลายคอลลอยด์วางบนแท่นปรับหมุนมุมตกกระทบ ปรับมุมตกกระทบที่ตำแหน่งกลางภาชนะในช่วง 0 - 75 องศา ตามลำดับ (เพิ่มครั้งละ 5 องศา) โดยทิศของมุมตกกระทบทำมุมอ้างอิงกับเส้นแนวตั้งฉากของภาชนะ (normal line) บันทึกภาพสเปกตรัมของแสงที่กระจายออกมาที่อีกด้านของภาชนะด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือที่ติดแผ่นเกรตติงไว้ด้านหน้ากล้อง (Figure 3)

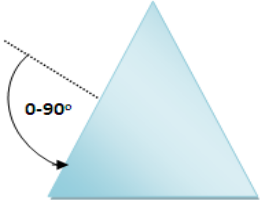


Figure 3 Various an incidence angle.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ชุดการสาธิตแสงเขียววาบ

จากการออกแบบและติดตั้งชุดการทดลองเพื่อสาธิตแสงเขียววาบในห้องปฏิบัติการแสง ได้ชุดอุปกรณ์การทดลองดังรูป (Figure 4) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงขาวเป็นหลอดไฟฉาย LED ซึ่งครอบด้วยท่อทรงกระบอกที่ปลายอีกด้านปิดด้วยช่องเปิดวงกลม (สร้างขึ้นเอง) เพื่อไม่ให้แสงกระจายออกและบังคับทิศทางแสงให้ออกมาเป็นลำ ผ่านเลนส์นูนที่ทำหน้าที่เป็นคอลลิเมเตอร์ โดยหลังผ่านเลนส์นูนเป็นลำแสงขนาน วางเลนส์นูนอยู่ห่างจากภาชนะทรงสามเหลี่ยมที่ใช้บรรจุสารละลายคอลลอยด์เป็นระยะทาง 10 เซนติเมตร เมื่อแสงตกกระทบของภาชนะจะสังเกตเห็นเส้นทางเดินของแสงภายใน และเห็นสเปกตรัมของแสงกระจายออกด้านข้างภาชนะด้านนอก บันทึกภาพสเปกตรัมของแสงด้วยกล้องถ่ายรูปโทรศัพท์มือถือที่ติดติดตั้งแผ่นเกรตติงไว้ด้านหน้า

จากชุดสาธิตการทดลอง เป็นการจำลองปรากฏการณ์แสงเขียววาบในธรรมชาติมาสร้างในห้องปฏิบัติการทางแสง ผู้วิจัยใช้หลอดไฟฉาย LED เพื่อทำหน้าที่เสมือนดวงอาทิตย์ที่เป็นแสงสีขาว ภาชนะชนะทรงสามเหลี่ยมด้านเท่าที่บรรจุสารละลายคอลลอยด์ ทำหน้าเสมือนชั้นบรรยากาศของโลกที่เกิดสมบัติการกระเจิงและกระจายของสเปกตรัมเป็นแสงสีต่างๆ สารละลอยคอลลอยล์จำลองเป็นฝุ่นในชั้นบรรยากาศ กล้องถ่ายรูปที่ติดแผ่นเกรตติงทำหน้าที่เป็นตาของผู้สังเกตเพื่อบันทึกภาพ

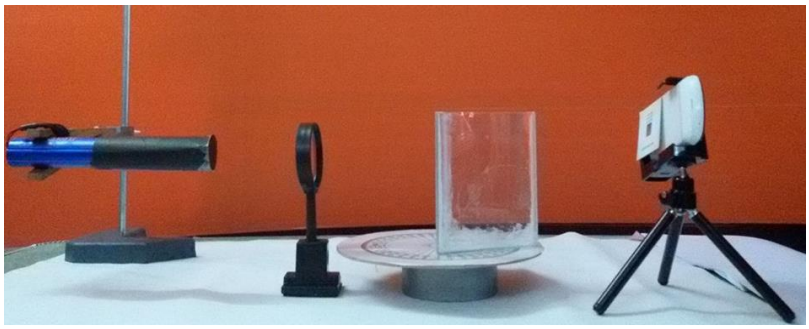
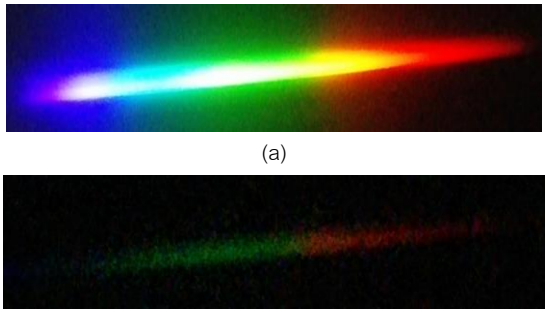


Figure 4 Experimental arrangement for green flash demonstration.

ผลการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์ที่เหมาะสม

ผลการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์ที่ความเข้มข้น 0.00-1.00 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร (โดยเพิ่มครั้งละ 0.05 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร) พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์เพิ่มขึ้นความหนาแน่นของโมเลกุลคอลลอยด์จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ภาชนะบรรจุน้ำ พบว่ามองไม่เห็นเส้นทางเดินแสง เมื่อใส่น้ำนมลงไปในน้ำจะเห็นเส้นทางเดินของแสงชัดเจนเนื่องจากมีการกระเจิงของแสงผ่านโมเลกุลคอลลอยด์ขนาดเล็ก สเปกตรัมของแสงที่บันทึกได้เกิดจากการกระจายของแสงเนื่องจากค่าดัชนีหักเหแสงของของเหลว (Refractive index) มีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับแสงสีต่างๆ แสงมีการหักเหที่ผิวรอยต่อระหว่างอากาศ-ของเหลว และของเหลว-อากาศ ตามลำดับ แล้วจึงเห็นเส้นทางเดินแสงกระจายออกมาประกอบด้วย สีม่วง น้ำเงิน เขียว เหลือง และแดง เรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา โดยแสงสีม่วงมีมุมเบี่ยงเบนแสง (Deviation angle) มากที่สุด และแสงสีแดงมีมุมเบี่ยงเบนแสงน้อยที่สุด ในการทดลองนี้พบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์ช่วง 0.00 – 0.20 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร จะมองไม่เห็นลำแสงเดินทางในน้ำ แต่ทะลุผ่านได้ทั้งหมดทุกแสงสี สังเกตจากภาพสเปกตรัมที่บันทึกได้มีครบทุกสี (Figure 5a) ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์ช่วง

0.20 – 0.30 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร จะมองเห็นลำแสงเดินทางทะลุผ่านได้ และสเปกตรัมของแสงคลื่นสั้นสีน้ำเงินหายไปเหลือแต่แสงความยาวคลื่นยาว สีเขียว เหลือง และแดง ตามลำดับ (Figure 5b) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์มากกว่า 0.30 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร พบว่าสารละลายเริ่มขุ่น สเปกตรัมของทุกแสงสีหายไป เนื่องจากความความเข้มข้นที่มากเกินไปจนแสงไม่สามารถทะลุผ่านออกมาได้เกิดเงื่อนไขการดูดกลืนแสง (Absorption) ดังนั้นปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดลองเพื่อสาธิตปรากฏการณ์แสงเขียววาบกับภาชนะทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า มุมยอด 60 องศา ที่มุมตกกระทบของแสง 45 องศา อยู่ระหว่าง 0.20-0.30 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร



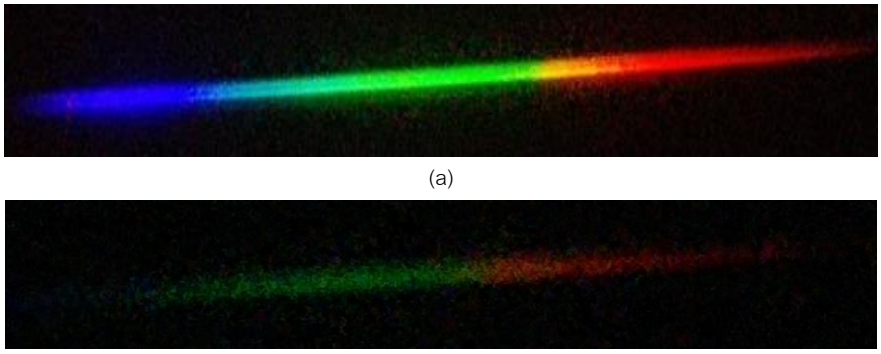
(a)

(b)

Figure 5 Light spectrum at colloidal solution concentrations. (a) 0.00 – 0.20% V/V (b) 0.20 -0.30 % V/V.

ผลการศึกษามุมตกกระทบของแสงด้านข้างภาชนะที่เหมาะสม

ผลศึกษามุมตกกระทบของแสงด้านข้างภาชนะ ใช้มุมตกกระทบของแสงช่วง 0 – 75 องศา (เพิ่มครั้งละ 10) โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นสารละลายคอลลอยด์ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แสงเขียววาบได้เหมาะสมที่สุดที่ความเข้มข้น 0.20 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร (ผลจากการทดลองที่ 1) พบว่าเมื่อปรับมุมตกกระทบของแสงด้านข้างภาชนะอยู่ในช่วง 0 – 45 องศา จะสังเกตเห็นสเปกตรัมของแสงครบทุกสี คือ สีน้ำเงิน เขียว เหลือง และแดง ตามลำดับเรียงจากซ้ายไปขวา (Figure 6a) เมื่อปรับมุมตกกระทบของแสงด้านข้างภาชนะเพิ่มขึ้นในช่วง 45 – 65 องศา พบว่าเห็นสเปกตรัมของแสงความยาวคลื่นยาวคือสีเขียว สีเหลืองและสีแดง ตามลำดับ สีน้ำเงินหายไป (Figure 6b) และเมื่อปรับมุมตกกระทบของแสงด้านข้างภาชนะมากกว่า 65 องศา พบว่าสเปกตรัมของทุกแสงสีหายไปทั้งหมด ดังนั้นมุมตกกระทบของแสงที่ด้านข้างภาชนะทรงสามเหลี่ยมด้านเท่ามุมยอด 60 องศา ความเข้มข้นสารละลายคอลลอยด์ 0.20 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตรที่เหมาะสมสำหรับการทดลองเพื่อสาธิตปรากฏการณ์แสงเขียววาบอยู่ในช่วง 45 – 65 องศา



(a)

(b)

Figure 6 Light spectrum at various incidence angle. (a) 0 - 45 degree and (b) 45 - 65 degree

สรุป

การทดลองนี้เป็นศึกษาเงื่อนไขการเกิดปรากฏการณ์แสงเขียววาบในธรรมชาติ ที่สังเกตเห็นสเปกตรัมของแสงความยาวคลื่น (สีเขียว สีเหลือง สีแดง)เท่านั้น โดยออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ทดลองอย่างง่ายเพื่อศึกษาและจำลองให้เห็นปรากฏการณ์แสงเขียววาบขณะที่ดวงอาทิตย์กำลังลับขอบฟ้าในห้องปฏิบัติการทางแสง พบว่าภาชนะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมทำหน้าที่เป็นปริซึมของเหลวแทนการเดินทางของแสงผ่านชั้นบรรยากาศระหว่างชั้นที่มีดัชนีหักเหแสงต่างกันและช่วยให้แสงกระจายสเปกตรัมได้ดี ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคอลลอยด์แทนความหนาแน่นของโมเลกุลในอากาศ และตำแหน่งมุมตกกระทบของแสงด้านข้างภาชนะแทนตำแหน่งของดวงอาทิตย์ มีผลต่อการเห็นปรากฏการณ์นี้ ในที่นี้ใช้ภาชนะรูปทรงสามเหลี่ยมด้านเท่า มุมยอด 60 องศา ที่มุมตกกระทบของแสงที่ด้านข้างภาชนะ 45 – 65 องศา โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นสารละลายคอลลอยด์ 0.20 ร้อยละโดยปริมาตรต่อปริมาตร เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการจำลองเกิดปรากฏการณ์แสงเขียบวาบในห้องปฏิบัติการครั้งนี้ สรุปได้ว่าปรากฏการณ์แสงเขียววาบในธรรมชาติเกิดจากสมบัติการหักเหและการกระจายของแสง โดยที่ในธรรมชาติไม่มีปริซึมจริง แต่รอยต่อระหว่างชั้นบรรยากาศเป็นตัวทำให้เกิดสมบัติการหักเหและการกระจายของแสง โดยที่ปรากฏการณ์นี้เกิดไม่บ่อยครั้งนัก เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อขนาดของอนุภาคในชั้นบรรยากาศและตำแหน่งของดวงอาทิตย์ต้องเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่ให้การสนับสนุนทุนโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) สำหรับข้าราชการครูประจำปีการศึกษา 2556 ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Courtial, J. 2012. A simple experiment that demonstrates the “green flash”. **American Journal of Physics** 80: 955-961.

Rayleigh, L. 1934. Further experiments in illustration of the green flash at sunset. **The Proceedings of the Physical Society** 46: 487-498.

สาขาวิทยาศาสตร์

Subject: Science

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว) ในข้าวไทย

Determination of Heavy Metals (Cd, Cr and Pb) in Thai Rice

วิภาดา ศิริอนุสรณ์ศักดิ์[1*] ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม[1] และ รัฐธิภา ธนารักษ์[2]

Wipada Siri-anusornsak[1*] Siriwan Soiklom[1] and Ratthipha Thanaruksa[2]

บทคัดย่อ

การศึกษาปริมาณโลหะหนักแคดเมียม โครเมียม และตะกั่วในเมล็ดข้าว โดยใช้เทคนิค AAS Graphite ในการศึกษาครั้งนี้มีตัวอย่างข้าวทั้งหมด 54 ตัวอย่าง ประกอบด้วย ข้าวขาว 27 ตัวอย่าง ข้าวกล้อง 21 ตัวอย่าง และข้าวสีนิล 6 ตัวอย่าง การปนเปื้อนโลหะหนักทั้งแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว ตรวจพบในข้าวขาว 15 ตัวอย่าง ข้าวกล้อง 6 ตัวอย่าง และข้าวสีนิล 2 ตัวอย่าง ซึ่งพบว่าตัวอย่างข้าวขาว ร้อยละ 7.41 และตัวอย่างข้าวกล้อง ร้อยละ 9.52 มีการปนเปื้อนแคดเมียมเกินค่ามาตรฐาน ขณะที่ครึ่งหนึ่งของตัวอย่างข้าวสีนิลพบการปนเปื้อนแคดเมียมแต่ไม่เกินค่ามาตรฐาน ขณะที่ร้อยละการปนเปื้อนโครเมียมที่เกินค่ามาตรฐานในตัวอย่างข้าวขาว ข้าวกล้องและข้าว สีนิล คือ ร้อยละ 33.33 ร้อยละ 23.81 และร้อยละ 50.00 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าตัวอย่างข้าวขาว ข้าวกล้องและข้าวสีนิลมีการปนเปื้อนตะกั่วเกินค่ามาตรฐาน คือ ร้อยละ 40.74 ร้อยละ 23.81 และร้อยละ 83.33 ตามลำดับ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าข้าวที่ทำการศึกษามีโลหะหนักปนเปื้อนเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยเฉพาะโครเมียมและตะกั่วที่มีการปนเปื้อนในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นการควบคุมปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนให้อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้จึงเป็นการประกันคุณภาพของข้าวที่สำคัญก่อนการส่งออกในแนวทางหนึ่ง

ABSTRACT

Quantification of 3 heavy metals, namely cadmium, chromium and lead in rice was investigated by using atomic absorption spectroscopy-graphite. In this study, there were 54 rice samples consisting of 27 white rice samples, 21 brown rice samples and 6 black rice samples. Cadmium, chromium and lead all found in 15 white rice samples, 6 brown rice samples and 2 black rice samples. We found that 7.41% of the white rice samples and 9.52% of the brown rice samples were contaminated with cadmium higher than the standard value while half of the black rice samples were also contaminated with cadmium but the contamination level below the standard level. Percentages of the white rice, brown rice and black rice samples containing chromium that exceeded the standard value were 33.33%, 23.81%, and 50.00%, respectively. In addition, 40.74%, 23.81% and 83.33% of the white rice, brown rice and black rice samples, respectively, were contaminated with lead higher than the standard value. This study shows a lot of the rice samples were contaminated with heavy metals, especially, chromium and lead, in unacceptable levels. Thus, control of heavy metal contamination in rice to acceptable levels is one of the indication for quality assurance before exporting.

Key Words: rice, AAS, graphite furnace, heavy metal, cadmium, chromium, lead

* Corresponding author; e-mail address: rdiwds@ku.ac.th

[1]ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Scientific Equipment and Research Division, Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ศูนย์วิจัยข้าวสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ 32000

[2]Surin Rice Research Center, Surin Province 32000

คำนำ

ข้าวเป็นผลิตผลหลักทางการเกษตรที่ผลิตขึ้นเพื่อการบริโภคภายในประเทศและเพื่อการส่งออก ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการปลูกข้าวมากที่สุดในประเทศไทย ข้าวมีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ชนิดต่างๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ทองแดง เป็นต้น แต่ในขณะเดียวกันอาจมีการปนเปื้อนของโลหะหนักบางชนิดจากการเพาะปลูกได้ เช่น แคดเมียม ตะกั่ว สารหนู ปรอท เป็นต้น โลหะหนักเป็นธาตุที่มีผลต่อสุขภาพของมนุษย์ ทั้งเป็นสารอาหารที่จำเป็นที่มนุษย์ต้องการในปริมาณที่น้อย แต่ถ้ามนุษย์ได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ โลหะหนักที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ เช่น แคดเมียม เป็นโลหะหนักที่เป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อม เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหารแล้วลำเลียงไปตามกระแสเลือดและจะจับกับโปรตีนที่ชื่อ Metallothionein สร้างสารประกอบเชิงซ้อนไปที่ไต ทำให้เกิดความเป็นพิษที่ไต (Park,2001) หรือโรคที่เป็นที่รู้จักกันมากจากพิษสารแคดเมียมคือ โรคอิไต อิไต เป็นต้น ตะกั่ว เป็นแร่ธาตุที่ทำให้เกิดความผิดปกติและเป็นพิษในระบบการทำงานของไต ทางเดินอาหาร ระบบประสาท รวมทั้งระบบไหลเวียน กลไกความเป็นพิษของตะกั่วเกิดจากการกระตุ้นปฏิกิริยาไลปิดเพอร์ออกซิเดชัน (lipid peroxidation) เป็นปฏิกิริยาที่ทำลายการทำงานของร่างกาย (อรุณศรี และคณะ, 2549)

คณะผู้วิจัยได้ตระหนักถึงความสำคัญของข้าวที่มีต่อประเทศไทย จึงทำการสุ่มตัวอย่างข้าวที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั้งภายในกรุงเทพฯ ปริมณฑลและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มาตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว โดยใช้เทคนิค AAS-Graphite โดยเก็บตัวอย่างทั้งข้าวหอมมะลิ ข้าวกล้อง และข้าวสีนิล ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน 2558 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการบ่งชี้คุณภาพของข้าว และนำไปเผยแพร่ให้ทราบถึงปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในข้าวไทยรวมทั้งตระหนักถึงความอันตรายที่เกิดขึ้นด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บตัวอย่าง

สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวสาร 54 ตัวอย่าง ประกอบด้วยข้าวขาว 27 ตัวอย่าง ข้าวกล้อง 21 ตัวอย่าง และข้าวสีนิล 6 ตัวอย่าง ที่มีจำหน่ายในตลาด ซุปเปอร์มาร์เกต และโรงสีข้าว พื้นที่ในกรุงเทพฯ ปริมณฑลและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน 2558 เป็นเวลา 3 เดือน

การเตรียมตัวอย่าง

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างข้าวสาร นำตัวอย่างเมล็ดข้าวมาบดจนละเอียด และชั่งตัวอย่างหนัก 0.5 กรัม ลงในหลอดทดลองสำหรับย่อยสลายตัวอย่าง เติมกรด HNO_3:$HClO_4$ ในอัตราส่วน 2:1 พร้อมกับทำ Blank ของวิธีการโดยใช้เฉพาะกรด HNO_3:$HClO_4$ จากนั้นย่อยสลายตัวอย่างที่เตรียมไว้โดยใช้เครื่อง Block Digester ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จนสารละลายใส กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร

นำสารละลายตัวอย่างมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Graphite Furnace ยี่ห้อ GBC รุ่น Avanta

การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. การศึกษากราฟมาตรฐานของสารละลายโลหะหนัก

1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว

1.1.1 สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 0, 1, 2, 3 และ 4 ppb

1.1.2 สารละลายมาตรฐานโครเมียมเข้มข้น 0, 20, 40, 60 และ 100 ppb

1.1.3 สารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 0, 10, 20, 30 และ 40 ppb

2. ใช้น้ำกลั่นเป็นสารละลาย Blank ทำการวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายมาตรฐานในข้อ 1

3. การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างข้าว

3.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว ให้มีความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานตามข้อ 1.1

3.2 นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Graphite Furnace ยี่ห้อ GBC รุ่น Avanta ในสภาวะที่เหมาะสม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์โลหะหนักในสารละลายตัวอย่างด้วยเทคนิค AAS-Graphite โดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงเป็นเส้นตรง พบว่ากราฟมาตรฐานของสารละลายโลหะหนักมีค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) มากกว่า 0.9950

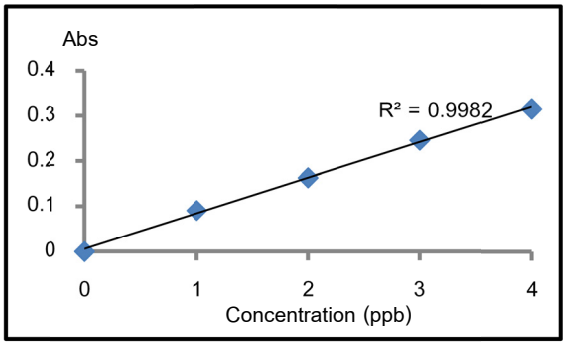


Figure 1 Standard curve of cadmium (Cd)

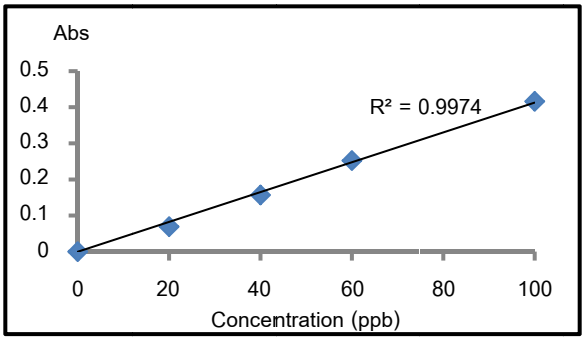


Figure 2 Standard curve of chromium (Cr)

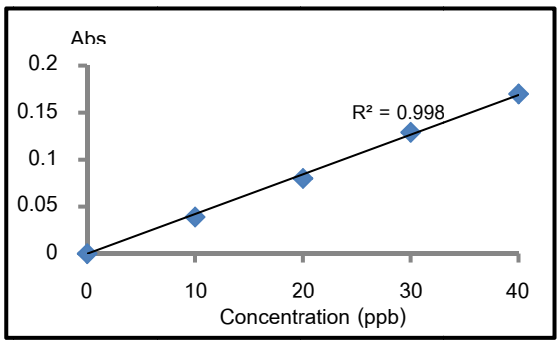


Figure 3 Standard curve of lead (Pb)

Figure 1-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโลหะหนักแคดเมียม โครเมียม และตะกั่วที่ความเข้มข้นต่างๆกับค่าการดูดกลืนแสง

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในข้าวไทย

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในข้าวไทย ได้แสดงผลดัง Table 1

Table 1 Heavy metal concentration in Thai rice

No.	Sample	Heavy metal concentration		
		Cd (mg/kg	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)
1	White Rice 1	0.10 ± 0.06	1.29 ± 0.17	1.67 ± 0.22
2	White Rice 2	N.D.	1.12 ± 0.13	0.92 ± 0.67
3	White Rice 3	0.04 ± 0.01	0.42 ± 0.00	0.79 ± 0.52
4	White Rice 4	N.D.	1.24 ± 0.04	1.79 ± 0.44
5	White Rice 5	N.D.	3.81 ± 1.96	0.01 ± 0.06
6	White Rice 6	N.D.	2.51 ± 1.17	0.04 ± 0.02
7	White Rice 7	N.D.	2.05 ± 0.47	0.08 ± 0.07
8	White Rice 8	0.03 ± 0.00	0.68 ± 0.18	0.77 ± 0.25
9	White Rice 9	0.04 ± 0.01	0.77 ± 0.37	0.10 ± 0.01
10	White Rice 10	0.01 ± 0.01	0.35 ± 0.20	0.17 ± 0.00
11	White Rice 11	0.02 ± 0.02	0.34 ± 0.02	0.19 ± 0.10
12	White Rice 12	0.08 ± 0.07	0.30 ± 0.09	0.15 ± 0.08
13	White Rice 13	0.07 ± 0.01	0.44 ± 0.15	0.12 ± 0.08
14	White Rice 14	0.29 ± 0.08	0.81 ± 0.16	0.05 ± 0.05
15	White Rice 15	0.18 ± 0.08	1.49 ± 0.45	0.30 ± 0.08
16	White Rice 16	0.01 ± 0.00	0.04 ± 0.00	N.D.
17	White Rice 17	N.D.	N.D.	N.D.
18	White Rice 18	N.D.	0.42 ± 0.09	N.D.
19	White Rice 19	0.09 ± 0.06	N.D.	N.D.
20	White Rice 20	0.02 ± 0.01	N.D.	N.D.
21	White Rice 21	0.06 ± 0.01	N.D.	N.D.
22	White Rice 22	0.05 ± 0.01	1.34 ± 0.05	0.81 ± 0.54
23	White Rice 23	0.03 ± 0.01	1.45 ± 0.04	0.40 ± 0.04
24	White Rice 24	0.02 ± 0.00	0.58 ± 0.24	0.51 ± 0.50
25	White Rice 25	0.04 ± 0.01	0.38 ± 0.19	0.95 ± 0.17
26	White Rice 26	0.06 ± 0.00	0.15 ± 0.03	0.24 ± 0.17

27	White Rice 27	N.D.	N.D.	N.D.
28	Brown Rice 1	N.D.	0.71 ± 0.14	0.82 ± 0.10
29	Brown Rice 2	N.D.	1.91 ± 0.20	1.00 ± 0.17

Table 1 (Cont.) Heavy metal concentration in Thai rice

No.	Sample	Heavy metal concentration		
		Cd (mg/kg	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)
30	Brown Rice 3	0.03 ± 0.01	0.40 ± 0.13	1.00 ± 0.14
31	Brown Rice 4	0.02 ± 0.01	1.24 ± 0.81	1.93 ± 0.33
32	Brown Rice 5	0.03 ± 0.03	N.D.	0.05 ± 0.03
33	Brown Rice 6	0.07 ± 0.02	0.49 ± 0.05	0.11 ± 0.08
34	Brown Rice 7	0.02 ± 0.01	0.96 ± 0.45	N.D.
35	Brown Rice 8	N.D.	N.D.	0.28 ± 0.08
36	Brown Rice 9	0.01 ± 0.01	1.06 ± 0.26	0.05 ± 0.01
37	Brown Rice 10	0.11 ± 0.01	0.83 ± 0.44	0.16 ± 0.11
38	Brown Rice 11	0.12 ± 0.01	0.83 ± 0.33	0.09 ± 0.01
39	Brown Rice 12	N.D.	N.D.	N.D.
40	Brown Rice 13	N.D.	N.D.	N.D.
41	Brown Rice 14	N.D.	N.D.	N.D.
42	Brown Rice 15	N.D.	N.D.	N.D.
43	Brown Rice 16	N.D.	N.D.	N.D.
44	Brown Rice 17	N.D.	N.D.	N.D.
45	Brown Rice 18	N.D.	N.D.	N.D.
46	Brown Rice 19	N.D.	N.D.	N.D.
47	Brown Rice 20	0.01 ± 0.00	2.53 ± 1.47	N.D.
48	Brown Rice 21	N.D.	1.96 ± 0.11	N.D.
49	Black Rice 1	N.D.	0.56 ± 0.16	0.59 ± 0.11
50	Black Rice 2	N.D.	1.37 ± 0.12	1.14 ± 0.07
51	Black Rice 3	0.04 ± 0.03	0.58 ± 0.10	N.D.
52	Black Rice 4	0.04 ± 0.03	1.60 ± 0.00	0.39 ± 0.14
53	Black Rice 5	0.04 ± 0.03	1.07 ± 0.08	0.23 ± 0.09
54	Black Rice 6	N.D.	N.D.	0.24 ± 0.10

Remark: N.D. = Not Detected

จาก Table 1 เมื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างทั้ง 54 ตัวอย่าง พบปริมาณการปนเปื้อนแคดเมียมในตัวอย่างข้าวขาว 19 ตัวอย่าง ข้าวกล้อง 9 ตัวอย่าง และข้าวสีนิล 3 ตัวอย่าง เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานสูงสุดของแคดเมียมในข้าวที่กำหนดโดยกลุ่มประชาคมยุโรป (European Communities) และมาตรฐานแห่งชาติสาธารณรัฐประชาชนจีน (National Standard of the People's Republic of China) ซึ่งกำหนดค่ามาตรฐานสูงสุดเท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่ามีข้าวขาว 1 ตัวอย่างเกินค่ามาตรฐานสูงสุด คือ 0.29 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐานสูงสุดของแคดเมียมในข้าวที่กำหนดโดยประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ (Food Standard Australia New Zealand: FSANZ) เท่ากับ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่ามีข้าวขาวเกินค่ามาตรฐานสูงสุดเพิ่มอีก 1 ตัวอย่าง คือ 0.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และข้าวกล้อง 2 ตัวอย่าง มีปริมาณการปนเปื้อนแคดเมียม 0.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งการปนเปื้อนแคดเมียมเกินค่ามาตรฐานสูงสุดของตัวอย่างข้าว คิดเป็นร้อยละ 7.41 ของตัวอย่างทั้งหมด 54 ตัวอย่าง ขณะที่ข้าวสีนิลมีการปนเปื้อนแคดเมียมอยู่ในระดับต่ำกว่ามาตรฐานสูงสุดที่กำหนดทั้ง 3 สถาบัน

การปนเปื้อนของโครเมียมในข้าว พบว่าในตัวอย่างข้าวขาว 22 ตัวอย่าง ข้าวกล้อง 11 ตัวอย่าง และข้าวสีนิล 5 ตัวอย่างมีการปนเปื้อนของโครเมียม เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานสูงสุดของโครเมียมในผลิตภัณฑ์เกษตรธัญพืชตามมาตรฐานแห่งชาติสาธารณรัฐประชาชนจีนที่กำหนดค่าสูงสุดเท่ากับ 1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าข้าวขาว 9 ตัวอย่าง มีปริมาณโครเมียมเกินค่ามาตรฐานสูงสุดที่กำหนดไว้ คิดเป็นร้อยละ 33.33 ปริมาณการปนเปื้อนโครเมียมอยู่ช่วง 1.12 – 3.81 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่ข้าวกล้องมีปริมาณโครเมียมเกินค่ามาตรฐานสูงสุดที่กำหนดไว้ 5 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 23.81 และข้าวสีนิลมีการปนเปื้อนโครเมียมสูงกว่าค่ามาตรฐานสูงสุดที่กำหนดไว้ 3 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 50.00 ปริมาณการปนเปื้อนโครเมียมในตัวอย่างอยู่ในช่วง 1.06 – 2.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นการปนเปื้อนโครเมียมเกินค่ามาตรฐานสูงสุดของตัวอย่างข้าวทั้งหมด 54 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 31.48

นอกจากนี้พบการปนเปื้อนของตะกั่วในตัวอย่างข้าวขาว 20 ตัวอย่าง ข้าวกล้อง 10 ตัวอย่าง และข้าวสีนิล 5 ตัวอย่าง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานสูงสุดของตะกั่วใน Cereals, legumes, pulses ที่กำหนดโดยกลุ่มประชาคมยุโรป มาตรฐานที่บังคับใช้กับอาหารทั้งหมดของประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ และมาตรฐานแห่งชาติสาธารณรัฐประชาชนจีน กำหนดค่าสูงสุดเท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าข้าวขาว 11 ตัวอย่าง ข้าวกล้อง 5 ตัวอย่างและข้าวสีนิล 5 ตัวอย่าง มีปริมาณการปนเปื้อนตะกั่วเกินค่ามาตรฐานสูงสุดที่กำหนดไว้ คิดเป็นร้อยละ 40.74 ร้อยละ 23.81 และร้อยละ 83.33 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณการปนเปื้อนตะกั่วอยู่ในช่วง 0.23-1.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นการปนเปื้อนตะกั่วเกินค่ามาตรฐานสูงสุดของตัวอย่างข้าว คิดเป็นร้อยละ 38.89 ของตัวอย่างข้าวทั้งหมด 54 ตัวอย่าง

ทั้งนี้การปนเปื้อนโลหะหนักในตัวอย่างข้าวนั้นอาจจะเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมตั้งแต่การเพาะปลูก กระบวนการเก็บเกี่ยว กระบวนการสีข้าว และการเก็บรักษาโดยบรรจุภัณฑ์ในการเก็บรักษาอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ จึงควรมีมาตรการการควบคุมปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนให้อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ก่อนมีการส่งออกขายไปยังประเทศคู่ค้า

สรุป

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าข้าวขาว ข้าวกล้องและข้าวสีนิลอย่างน้อย 1 ตัวอย่าง มีการปนเปื้อนโลหะหนักอย่างน้อย 1 ชนิด ตัวอย่างข้าวทั้งหมด 54 ตัวอย่าง มีการปนเปื้อนแคดเมียมเกินค่ามาตรฐานสูงสุด 4 ตัวอย่าง แบ่งเป็นข้าวขาวและข้าวกล้อง อย่างละ 2 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 7.41 ของตัวอย่างข้าวทั้งหมด การปนเปื้อนโครเมียมเกินค่ามาตรฐานสูงสุดพบในข้าวขาว ข้าวกล้องและข้าวสีนิลคิดเป็นร้อยละ 33.33 ร้อยละ 23.81 และร้อยละ 50.00 ตามลำดับ ข้าวสีนิลมีการปนเปื้อนตะกั่วเกินค่ามาตรฐานสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 83.33 ขณะที่ข้าวขาวและข้าวกล้องมีร้อยละการปนเปื้อนของตะกั่วเกินค่ามาตรฐานสูงสุดที่กำหนดไว้ คือ ร้อยละ 40.74 และร้อยละ 23.81

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

อรุณศรี ปรีเปรม, บังอร ศรีพานิชกุลชัย, จินตนา จุลทรรศน์ และ ผดุงขวัญ จิตโรภาส. 2549. โลหะหนักในสารสกัดสมุนไพรและยาแผนโบราณ. **วารสารเภสัชศาสตร์อีสาน** 2(1): 43-52.

Food Safety of Authority of Ireland. 2009. Mercury, lead, cadmium, tin and arsenic in food. **Toxicology** 1: 10.

Food Standards Australia New Zealand. 2013. Standard 1.4.2 Contaminants and natural toxicants. **Food Standards Code** 53: 4.

Ministry of Health of the People's Republic China. 2013. National food safety standard maximum levels of contaminants in food. **National Standard of the People's Republic of China**: 2-7.

Official Journal of the European Union. 2014. The annex to regulation (EU) No 1881/2006 as regards maximum levels of cadmium in foodstuffs. **Commission Regulation (EU) No 488/2014**: 78.

Park, J. D., Liu, Y. and Klaassen, C. D. 2001. Protective effect of metallothionein against the toxicity of cadmium and other metals. **Toxicology** 163: 93-100.

การวิเคราะห์แนวโน้มความยาวนานแสงแดดระหว่างปี 1958 และ 2012 สำหรับจังหวัดนครสวรรค์

Trend Analysis of Sunshine Duration between 1958 and 2012, Nakhon Sawan Province

ศุภวัฒน์ วิสิฐศิริกุล[1*]

Supawat Wisitsirikun[1*]

บทคัดย่อ

ความยาวนานแสงแดด คือ ผลรวมจำนวนชั่วโมงที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์มีค่ามากกว่า 120 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกดอกและเจริญเติบโตของพืช วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาลักษณะทางสถิติและแนวโน้มความยาวนานแสงแดด ระหว่างปี 1958 และ 2012 สำหรับจังหวัดนครสวรรค์ โดยใช้โดยวิธีการทดสอบ Mann-Kendall ในการวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความยาวนานแสงแดดตามฤดูกาลในรอบปี การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในปีต่างและแนวโน้มตามรายปีต่างๆ พบว่าการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลในรอบปี พบว่า ความยาวนานแสงแดดมีค่ามากที่สุดในเดือนเมษายน และต่ำสุดในเดือนสิงหาคม ในด้านการแปรตามฤดูกาลในปีต่างๆ พบว่า ความยาวนานแสงแดดของฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว มีแนวโน้มลดลง สำหรับการแปรค่าเฉลี่ยรายปี พบว่าความยาวนานแสงแดด มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าเฉลี่ยรายปีสูงสุดในปี 1979 และ ต่ำสุดในปี 1995

ABSTRACT

The sunshine duration is the total number of hours of sunshine in which solar radiation intensity is greater than 120 watts per square meter. This duration was vital for efflorescence and plant growth. This research aims to analyze the sunshine duration during 1958 to 2012 for Nakhon Sawan Province. Data was analyzed by Mann-Kendall test for the changing seasons of the year. It was revealed that the sunshine duration was at the most in April and was at the lowest in August. The changing season it was fond that the sunshine duration was downward in summer, raining and winter. The sunshine duration during 1958 to 2012 was downward at the significant level. The highest of sunshine duration was in 1979 and the lowest in 1995.

.

Key words: sunshine duration, trend analysis

*Corresponding author; e-mail address: **supawat.kpru@gmail.com**

[1]โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร 62000

[1]Department of General Science, Faculty of Education, Kamphang Phet Rajabhat Kamphaeng Phet 62000

คำนำ

ภูมิอากาศของโลกมีการศึกษามากขึ้นโดยนักวิจัยเนื่องจากปรากฏการณ์ภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นสิ่งสำคัญเพราะส่งผลต่อความหลากหลายทางชีวภาพและส่งผลต่อกิจกรรมของสังคมมนุษย์ ระบบเศรษฐกิจ และพืชผลทางการเกษตร สภาพภูมิอากาศจะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลายอย่างรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลก วงโคจรของโลก การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์และกิจกรรมที่กระทำโดยมนุษย์ และปฏิกิริยาระหว่างสภาพภูมิอากาศ พืช มหาสมุทร แผ่นน้ำแข็ง หรือสภาพพื้นดินยังคงเป็นปัจจัยภายในที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Ruddiman, 2008) ดังนั้นสภาพภูมิอากาศมีความซับซ้อนมากและแม้กระทั่งการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในหนึ่งในหลายๆปัจจัยก็อาจส่งผลกระทบขนาดใหญ่ต่อระบบโดยรวม

การแผ่รังสีของอาทิตย์มายังโลกยังเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสิ่งมีชีวิตบนโลกซึ่งรวมถึงกิจกรรมที่มนุษย์กระทำอีกทั้งพลังงานแสงอาทิตย์มีส่วนสำคัญในการควบคุมสภาพภูมิอากาศของโลก นอกจากนี้พลังงานแสงอาทิตย์ยังเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ เช่น การตกของหิมะ การสังเคราะห์แสงของพืช การละลายของธารน้ำแข็ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามฤดูกาล (Wild, 2009) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อสภาพอากาศของโลก

การเปลี่ยนแปลงรังสีดวงอาทิตย์จึงมีความสำคัญเนื่องจากเหตุผลดังกล่าว และจะรู้ผลเหล่านี้ได้ต้องทำการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูล รังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก หรือจากค่าความยาวนานแสงแดด ค่าอุณหภูมิ และจากภาพถ่ายดาวเทียม (Wild, 2009)

จากอดีตที่ผ่านมามีตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัด เช่น วัฏจักร Milankovitch ที่มีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงวงโคจรของโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศของโลกในช่วงที่ผ่านมา และวัฏจักรจุดดับบนดวงอาทิตย์ในรอบ 11 ปีที่ผ่านมา มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ ยิ่งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมากระบวนการที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพราะเป็นกิจกรรมที่ส่งผลต่อการส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ในชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงที่รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกบนพื้นผิวโลกที่ผ่านชั้นบรรยากาศ ในความเป็นจริงการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลมาจากฝุ่นละอองที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ (Stanhill, 2005)

สำหรับจังหวัดนครสวรรค์ เป็นจังหวัดที่อยู่ในเขตภาคเหนือตอนล่างพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่ราบลุ่มประชากรส่วนมากทำการเกษตรเป็นอาชีพหลัก แต่ในปัจจุบันสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศเกษตรอย่างสูง เช่น พื้นที่การเกษตรเสียหายจากภัยธรรมชาติ ไม่สามารถให้ผลผลิตได้ พื้นที่การเกษตรให้ผลผลิตลดลง การระบาดของโรค แมลง และรวมถึงพรรณพืชท้องถิ่นสูญหาย จากเหตุผลข้างต้นความยาวนานแสงแดดเป็นตัวบ่งชี้หนึ่งที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและมีประโยชน์ต่อการออกดอกและการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงประโยชน์ในด้านการเลือกปลูกพืชให้เหมาะกับท้องถิ่น และที่จังหวัดนครสวรรค์ได้มีบันทึกความยาวนานแสดงแดดเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาลักษณะสถิติและแนวโน้มความยาวนานแสงแดด ที่แปรตามฤดูกาล และตามปี ในจังหวัดนครสวรรค์

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้น เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มความยาวนานแสงแดด ในจังหวัดนครสวรรค์ โดยใช้การทดสอบ Mann-Kendall ในการวิเคราะห์แนวโน้มความยาวนานแสงแดด ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลความยาวนานแสงแดดที่ได้จากเครื่องบันทึก Campbell-Stokes ที่เป็นรายเดือนของสถานีอุตุนิยมวิทยา จังหวัดนครสวรรค์ระหว่างปี 1958-2012 ซึ่งวิธีการทดสอบ Mann-Kendall เป็นการทดสอบทางสถิติแบบไม่มีพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายสำหรับใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้มข้อมูลที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มีรายละเอียดตามสมการ (Hirsch et al. 1982; Modarres and Silva 2007) ดังนี้

$$S= \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i-x_j) \quad (1)$$

เมื่อ x_i และ x_j คือลำดับของข้อมูล ,n คือจำนวนข้อมูล และ

$$\text{sign}\left(x_i-x_j\right)= \begin{cases} +1 & \text{if} x_i-x_j>0 \\ 0 & \text{if} x_i-x_j=0 \\ -1 & \text{if} x_i-x_j<0 \end{cases} \quad (2)$$

ทำให้หาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของสถิติทดสอบ $\boldsymbol{S}$ ดังนี้

$$\text{vas}\left(s\right)= \frac{\left[n(n-1)(2n+5)- \sum_{p=1}^{q} t_p(t_p-1)\left(2t_p+5\right)\right]}{18} \quad (3)$$

และ

$$z= \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{vas}(S)}} & \text{if } S>0 \\ 0 & \text{if } S=0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{vas}(S)}} & \text{if } S<0 \end{cases} \quad (4)$$

ค่าบวกของ z ในสมการที่ (4) เป็นการแสดงถึงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าลบของ z แสดงถึงแนวโน้มที่ลดลง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การแปรค่าความยาวนานแสงแดดตามฤดูกาลในรอบปี

การแปรค่าความยาวนานแสงแดดตามเวลาในรอบปีมีความสำคัญ คือ จะทำให้ทราบแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงชั่วโมงมีแดดของเดือนต่างๆในรอบปี ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาความยาวนานแสงแดดตามฤดูกาลในรอบปี พบว่า ความยาวนานแสงแดดจะมีค่า เพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคม จนสูงสุดในเดือนเมษายน (8.7 ชั่วโมง) จากนั้นค่าความยาวนานแสงแดดจะลดลงอย่างต่อเนื่องและต่ำสุดในเดือนสิงหาคม (5.0 ชั่วโมง) หลังจากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึงเดือนธันวาคม (Figure 1)

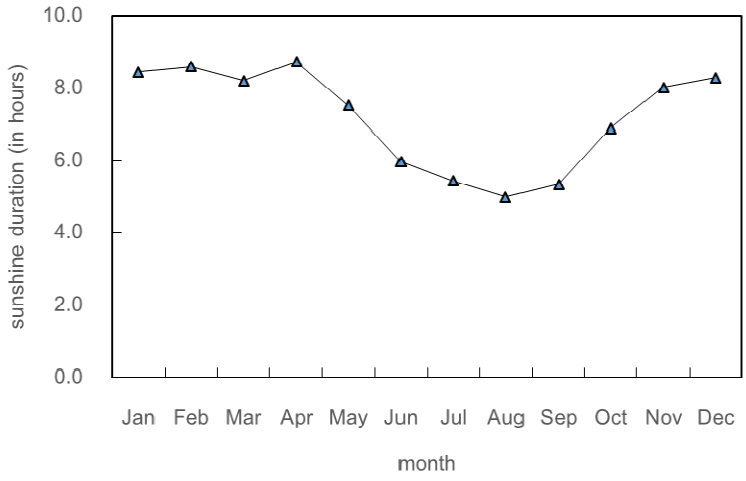


Figure 1 Monthly average sunshine duration (1958-2012)

2. การแปรค่าความยาวนานแสงแดดตามฤดูกาลระหว่างปีต่าง ๆ

การแปรค่าความยาวนานแสงแดดตามฤดูกาลระหว่างปีต่างๆ จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของแต่ละฤดูกาลซึ่งมีความสำคัญ ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว พบว่า ความยาวนานแสงแดดของ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาวมีแนวโน้มที่ลดลง โดยฤดูฝนมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .10 (z=-1.82) และฤดูหนาวมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .01 (z=-3.80) อย่างไรก็ตามที่ระดับนัยสำคัญที่ต่างกันของฤดูฝนกับฤดูหนาว แสดงให้เห็นว่าฤดูฝนมีแนวโน้มการลดลงที่ยังไม่ชัดเจน สำหรับฤดูหนาวแนวโน้มมีการลดลงอย่างชัดเจน (Kundzewicz, Z.W. and Robson, A., 2000) (Figure 2)

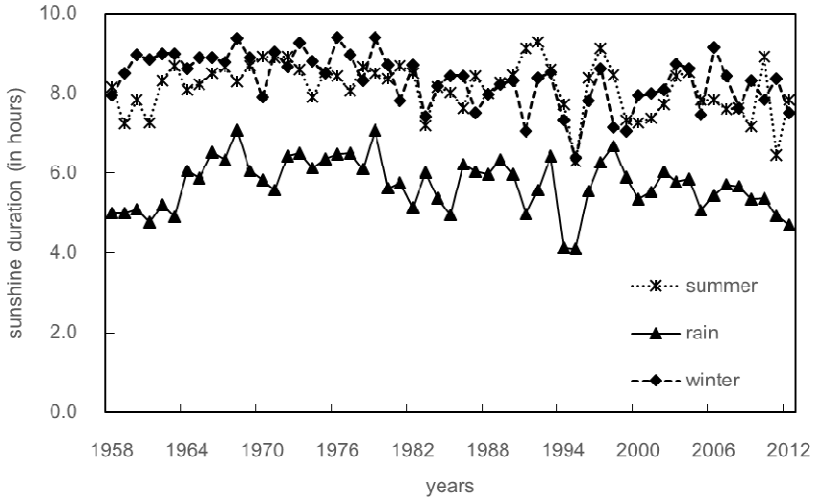


Figure 2 Seasonal average sunshine duration (1958-2010)

3. การแปรค่าความยาวนานแสงแดดตามปีต่าง

โดยทั่วไปค่าความยาวนานแสงแดด นอกจากมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบปี แล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงตามปีต่างๆ ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ดังกล่าว พบว่า ความยาวนานแสดงในช่วง 1958 ถึง 1979 มีการเพิ่มขึ้นและสูงสุดในปี 1979 จากนั้นตั้งแต่ปี 1979 ถึง 2012 มีแนวโน้มที่ลดลง และมีความยาวนานแสงแดด

น้อยสุดในปี 1995 เมื่อมองในภาพรวมจะเห็นว่าค่าความยาวนานแสดงแดดของสถานีนครสวรรค์มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .01 (z=-2.98) (Figure 3) สำหรับความยาวนานแสงแดดที่ลดลง เป็นผลจากการการเปลี่ยนแปลงวงโคจรของโลก วัฏจักร Milankovitch ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศของโลกในช่วงที่ผ่านมา (IPCC, 2007) และวัฏจักรจุดดับบนดวงอาทิตย์ในรอบ 11 ปีที่ผ่านมา มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ ทำให้ความยาวนานแสงแดดลดลง (Van Loon, H., Labitzke, K., 2000) รวมถึงฝุ่นละอองที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์และการระเบิดของภูเขาไฟล้วนมีผลต่อการก่อตัวและอายุของเมฆซึ่งเป็นตัวการสำคัญในการทำให้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกลดลง (Nunez, 1993)

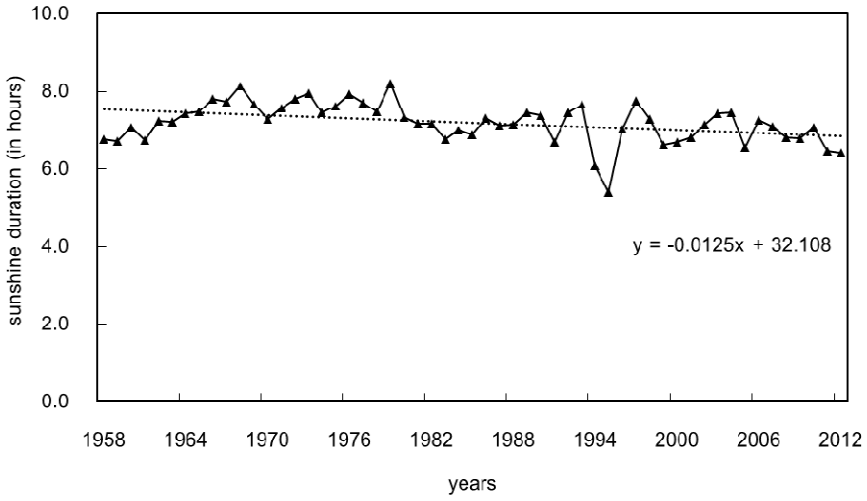


Figure 3 Years average sunshine duration (1958-2012)

สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์แนวโน้มความยาวนานแสงแดด ระหว่างปี 1958 และ 2012 สำหรับจังหวัดนครสวรรค์ โดยวิเคราะห์แนวโน้มกรณีแปรค่าตามเวลาในรอบปีพบว่าความยาวนานแสงแดดมีค่ามากที่สุดในเดือนเมษายน และต่ำสุดในเดือนสิงหาคม ในด้านการแปรค่าตามฤดูกาลในรอบ 55 ปี พบว่า ความยาวนานแสงแดดของฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว มีแนวโน้มลดลง สำหรับการแปรค่าเฉลี่ยรายปี ตั้งแต่ปี 1958-2012 จะเห็นว่าความยาวนานแสงแดด มีแนวโน้มลดลง โดยค่าเฉลี่ยรายปีสูงสุดในปี 1979 และ ต่ำสุดในปี 1995 ถึงแม้ว่า ความยาวนานแสงแดดจะมีผลต่อการออกดอกและการเจริญเติบโตของพืช อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากการการวิจัยนี้ กลุ่มเกษตรกรอาจจำเป็นต้องศึกษาความต้องการแสงแดดของพืชแต่ชนิดและให้เหมาะสมกับสภาพของท้อถิ่น สำหรับในการวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาความยาวนานแสงแดดให้ครอบคลุมพื้นที่ของประเทศไทยเพื่อเป็นข้อมูลให้กับกลุ่มเกษตรกร กลุ่มพลังงานทดแทน และผู้สนใจทั่วไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมอุตุนิยมวิทยาศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ข้อมูลความยาวนานแสงแดด และผู้อำนวยการสถานีอุตุนิยมวิทยา จังหวัดนครสวรรค์ ที่อนุเคราะห์สาธิตการใช้งานเครื่อง Campbell –Stokes และขอขอบคุณสถาบันวิจัย และพัฒนา มหาวิทยาราชภัฏกำแพงเพชร ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Arturo Sanchez-Lorenzo, Josep Calbo and Javier Martin Vide. 2008. Spatial and temporal trend in sunshine duration over western Europe (1938-2004). **American Meteorological Society**.

Hirsch RM, Slack JR, and Smith RA. 1982. Tecniques of trend analysis for monthly water quality Data. **Water Resour Res** 1: 107-121.

IPCC 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press.

Kundzewicz, Z.W. and Robson, A. (Editors) (2000) Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Program – Water, WMO/UNESCO, WCDMP-45, WMO/TD 1013, Geneva, 157 pp.

Louis, E. AKPABIO and Sunday, E. ETUK. 2002 .Relationship Between Global Solar Radiation and Sunshine Duration for Onne, Nigeria. **Turk J Phys** 27 : 161-167.

Modarres R and Silva. 2007. Rainfall trend in arid & semi-arid region of Iran. **J Environ** 70: 344-355.

Matzarakis A.P. and katsoulis V. D. 2006 Sunshine duration hours over the Greek region. **Theoretical and Applied Climatology**.83.: 107-120.

Nunez, M. (1993). The development of a satellite-based insulation model for the Tropical Pacific Ocean. Journal of Climatology, 13, 607-627.

Ruddiman W. 2008. Earth's Climate: past and future, 2nd ed. **New York: W. H. Freeman and Company**, pp. 8–10.

Stanhill G. 2005. Global dimming : A new aspect of climate change. **Weather**, vol. 60, pp. 11–14.

Van Loon, H., Labitzke, K., 2000. The inuence of the 11-year solar cycle on thestratosphere below 30km: A review. Space Sci. Rev., 94, 259-278.

Wild M. 2009. Global dimming and brightening: A review, **Journal of Geophysical Research**, vol.114, p. D00D16.

Ying wang and Lei Zhang. 2010. Relationship between global solar radiation and sunshine duration for Northwest China , **international Journal of the Physical Science**. Vol 5(7) : 1023-1033.

Electrical Properties of n-ZnSe/p-Si (100) Heterojunction Thin Film Device

Chaniporn Juthaisong[1*], Thitinai Gaewdang[1] and Ngamnit Wongcharoen[1]

ABSTRACT

In this work, ZnSe thin films were deposited by thermal evaporation in vacuum on slide glass substrate. The XRD analysis reveals that ZnSe thin films are polycrystalline having a cubic zincblende structure with a preferential orientation (111) plane. The morphological, optical and electrical properties of ZnSe thin film were investigated using FESEM, AFM, transmission and resistivity measurements, respectively. The n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction was fabricated by thermal evaporating ZnSe thin films on p-Si (100) substrate. The current – voltage characteristics of n-ZnSe/p-Si (100) were investigated in temperature range 20-300 K. Some important parameters such as barrier height, ideality factor and series resistance values evaluated by using thermionic emission (TE) theory and Cheung's method at room temperature are n = 4.878, ϕ_{B0} = 0.755 eV, 1.18×10^{4} Ω, respectively. The temperature dependence of the saturation current and ideality factor are well described by tunneling enhanced recombination at junction interface with activation energy and characteristic energy values about 1.968 eV and E_{00} = 102 meV, respectively. The carrier concentration of ZnSe thin films about 1.36×10^{13} cm^{-3} was deduced from the C-V measurements at room temperature.

Keywords: I-V Characteristics ZnSe thin films, n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction and Thermionic emission

*Corresponding author; e-mail address: jc.chaniporn@gmail.com

[1]Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1, Soi Chalongkrung 1, Ladkrabang District, Bangkok 10520, Thailand.

INTRODUCTION

Zinc selenide (ZnSe), a II-VI compound semiconductor, with cubic zinc blende structure and with a direct band-gap of 2.7 eV (Ivashchenko et al., 2015), is found to be a very promising material for sensor application optoelectronic and heterojunction solar cells. It has been used in many applications such as protective and antireflection coating for light-emitting diode, and photodiodes, since most electronic devices are produced in the form of thin films. In particular, the ZnSe/Si heterojunction is of specific interest since this structure provides effective solar cell and enables the integration of wide bandgap device in silicon circuits (Mangalaraj et al., 2007). Because of the difference in physical parameters such as lattice constants, thermal expansion coefficients and ionicity between ZnSe and Si, this material system suffers from a number of crystalline defects, which have a deleterious effect on the optical and electronic properties and may be responsible for the reduction of the device lifetime. In order to fully incorporate ZnSe on optoelectronic, efforts must be made to integrate ZnSe with the Silicon based microelectronics. Such efforts would primarily require a rigorous study of ZnSe/Si heterostructure. The present paper reports one such attempt of preparation and characterization of n-ZnSe/p-Si heterojunction.

EXPERIMENTAL DETAILS

The slide glass substrates were cleaned with detergent, degreased with trichloroethylene, acetone, ethanol and rinsed with deionized water in an ultrasonic cleaner. The n-Si substrates were cleaned using standard RCA cleaner and then the Si substrates were dipped in 30% KOH solution for 10 sec to remove the native oxide present on the surface (Gao et al., 2012), and finally rinsed with de-ionized (DI) water/ blow-dry with nitrogen gas.

ZnSe thin films were deposited on slide glass and on Si (100) substrates by a single source thermal evaporation in vacuum better than 3.5×10^{-5} mbar by keeping the substrate temperature at 80 ˚C. High purity (99.99%) ZnSe in powder form was used as source material for preparing ZnSe films and tungsten boat was used to evaporate the source material. Schematic diagram of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction is shown in Figure 1. Silver was used as contact material as it forms good ohmic contact with ZnSe and Si.

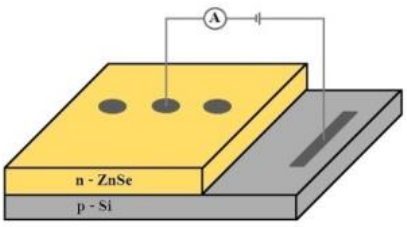
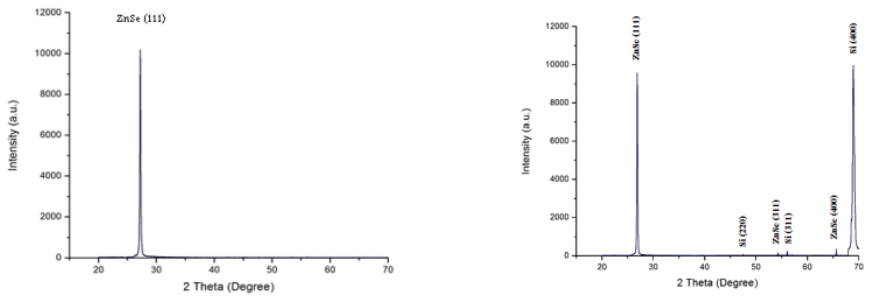


Figure 1 The schematic diagram of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction.

The crystal structure of these films was checked by X-ray diffraction technique with a Brucker D8 Diffractometer using CuK_{α} radiation. Surface morphology and grain size were revealed in accordance to FESEM carried out at acceleration 15 kV and AFM with non-contact mode. The films thickness about 500 nm was controlled using a crystal thickness monitor (Edwards type FTM6). The current voltage (I-V) characteristic curves were measured at various temperatures using a computer interfaced Keithley 236 current / voltage source.

RESULTS AND DISCUSSION

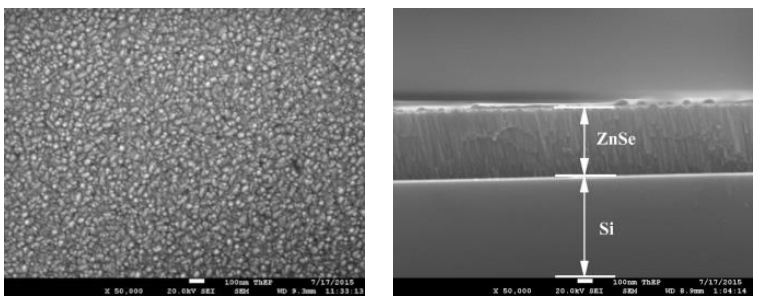
The XRD patterns of the ZnSe films deposited on slide glass and on Si (100) substrates is shown in Figure 2. Crystal structure of ZnSe thin film is zincblende structure with the preferred orientation of (111), even though the substrate has (400) orientation, those peaks correspond to the reflection structure and were indentified by comparing them to the JCPDS card no. 80-8 (for ZnSe) and no. 27-1402 (for Si).



(a) (b)

Figure 2 XRD patterns of ZnSe thin films deposited on slide glass (a) and on p-Si substrates (b).

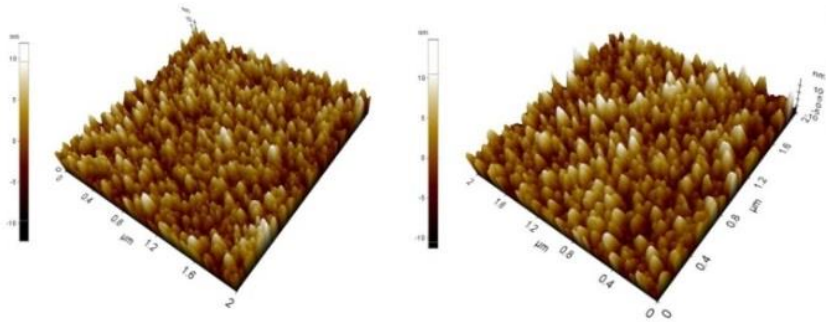
The typical FESEM image of n-ZnSe thin films on p-Si (100) substrate is shown in Figure 3(a). The surface nanostructure of the ZnSe thin films showed a very small grain with size less than 100 nm. Cross section through such n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction has shown the growth to be essentially columnar present in Figure 3(b).



(a) (b)

Figure 3 FESEM images of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction showing top view image (a) and cross section image (b).

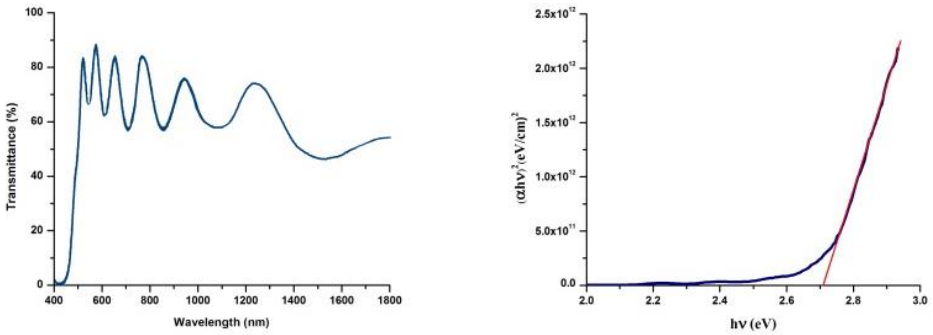
Figure 4(a) shows three dimensional (3D) AFM images of the ZnSe films deposited on slide glass substrate and Figure 4(b) shows 3D- AFM image of the ZnSe films deposited on Si (100) substrate. The photographs indicate that the films are smooth and continuous without any cracks.



(a) (b)

Figure 4 AFM images of ZnSe films deposited on slide glass (a) and on Si (100) substrates (b).

Figure 5(a) shows the transmittance spectrum as a function of wavelengths for ZnSe thin films deposited on slide glass substrate. It is seen that the sharp fall of transmittance at the band edge is quite sharp. The plot of $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ is shown in Figure 5(b). By extrapolating the linear segments of the curve to the $h\nu$ axis, we obtained the estimated optical band gap of 2.71 eV. This value is in good agreement with those reported by Mangalaraj et al (2007). Electrical resistivity value of ZnSe thin films deposited on slide glass substrate was performed at room temperature is around 2.5×10^5 Ω.cm.



(a) (b)

Figure 5 Transmission spectrum of ZnSe films deposited on slide glass substrate (a) and the plot of $(\alpha h\nu)^2$ vs. $h\nu$ of the ZnSe thin films for determining the band gap.

The I-V characteristics of the n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction where the measurement temperature range from 20-300 K were indicated in Figure 6(a). These I-V characteristics confirm that a p-n heterojunction diode is formed at the interface of the ZnSe/Si heterojunction with the n-type nature of the ZnSe thin films and p-type character of the Si. According to the thermionic emission (TE) theory, the forward current varies with the voltage according to the equation (Nahass et al., 2008)

$$I = I_s\left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)-1\right] \quad (1)$$

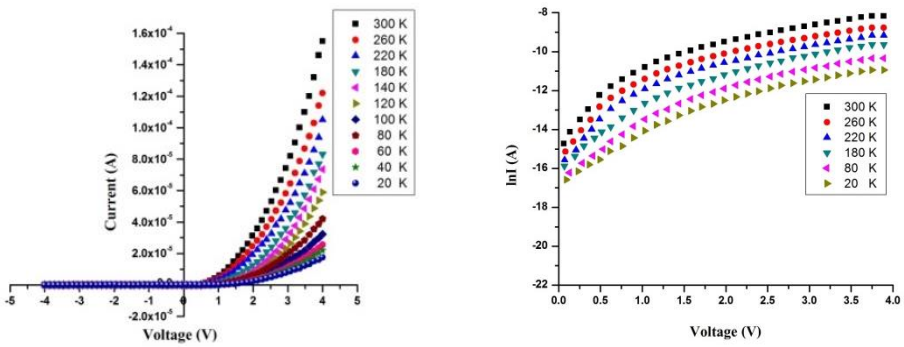
and

$$I_s = AA^*T^2\exp\left[-\frac{q\Phi_b}{kT}\right] \quad (2)$$

where q is the unit charge, n is the ideality factor, k is the Boltzmann's constant, T is the absolute temperature, I_s is the reverse saturation current, A is the device area, A* is the Richardson's constant and Φ_b is the zero bias barrier height of the diode. From Eq. (1), the ideality factor n which is given by

$$n = \left(\frac{q}{kT}\right)\left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) \quad (3)$$

Then, we have performed least square fits of Eq. (1) to the linear part of the measured ln$I$-V plots (Figure 6(b)) within bias voltage about 0.2- 0.7 V. From these fits, the experimental values of I_S were determined at different temperatures. Using Eqs. (2) and (3), the experimental values of the barrier height and ideality factor were determined. The n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction with a large value of n (about 4.878 at 300 K) is far from ideal due to particular distribution of interfacial layer and interface states between ZnSe thin films and Si substrate (Altindal et al., 2007). The value of the barrier height was found to be 0.755 eV at room temperature. Its value decreases to 0.047 eV when the temperature decreases to 20 K.

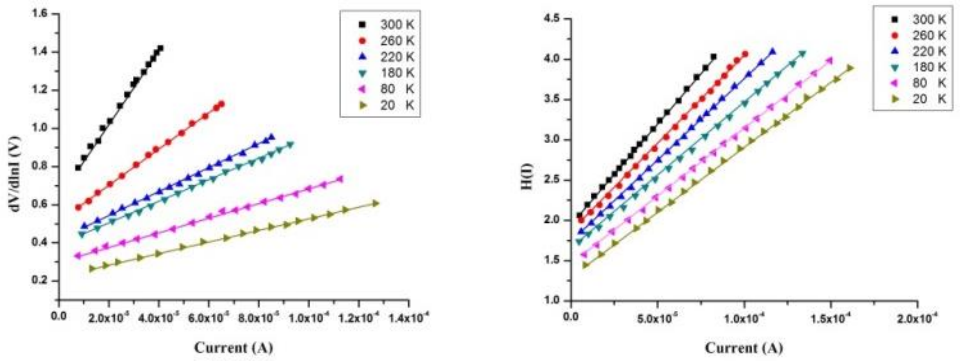


(a) (b)

Figure 6 I-V plot (a) and ln$I$-V plot (b) of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction at various temperatures.

The value of R_s was calculated from the forward bias I-V data using the Cheung's method. Figure 7(a) and 7(b) are shown experimental dV/d(ln$I$) vs. I and H(I) vs. I plots at various temperatures for of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction diode. There, the slope of dV/d(ln$I$) vs. I plot will give R_s and nkT/q as the y-axis intercept. Using the n value determined from the plots of H(I) vs. I will also give a straight line with y-axis intercept equal to $n\phi_{B0}$; the slope of these plots also provides a second method to determine the values of R_s, which can be used to check the consistency of this approach. The values of R_s (in order $10^4\Omega$) obtained from dV/d(ln$I$)-I and H(I)-I plots are

approximately equal to each other's. The calculated n, ϕ_{B0} and R_S were found to be strongly temperature dependent.



(a) (b)

Figure 7 dV/d(lnI)-I (a) and H(I)-I plots (b) of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction at various temperatures.

The forward biased current shows a power law exponent of the form $I = kV^m$ over all the measured temperature range (Figure 8). At low bias voltage region (region I), current is linearly dependent on voltage V exhibiting an Ohmic behavior due to its slope is nearly equal 1. On the other hand, at medium voltage region (region II), a non- linear region appears according to thermionic emission (TE) mechanism. As applied bias voltage higher than 0.7 V (region III), the strong injection of space charge limited current (SCLC), with its slope nearly 2.4, was observed. A new approach explaining the tunneling enhancement of recombination via deep centers in the space charge region or at junction interface was recently for the forward current transport in CIGS based solar cells (Bayhan and Kavasoglu, 2005). Rearranging Eq. (1) yields the relationship

$$n \ln J_s = \frac{E_a}{kT} + n \ln J_{oo} \qquad (4)$$

Thus, a plot of $n\ln J_s$ versus 1/kT should yield a straight line where the slope provides activation energy (E_a). The E_a deduced from Figure 9 is 1.79 eV which smaller than energy gap of ZnSe (E_g=2.71 eV). Thus, it is reasonable to suggest that the E_a corresponds to the potential barrier as seen by hole. Furthermore, tunneling of holes from the bulk of n-Si into the interface states and subsequent recombination with electrons available in ZnSe layer leads the temperature dependence of the diode ideality factor as

$$n = \left(\frac{E_{oo}}{kT}\right)\coth\left(\frac{E_{oo}}{kT}\right) \quad (5)$$

where E_{00} is the characteristic tunneling energy measuring the amount of tunneling contribution to the recombination process. From Figure 10, the large value of E_{00} about 102 meV suggests that tunneling enhancement recombination via deep centers at junction interface provides analytical expression for the forward current transport in our diode.

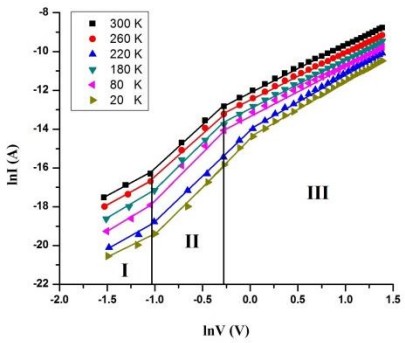


Figure 8 lnI -lnV plot of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction at various temperatures.

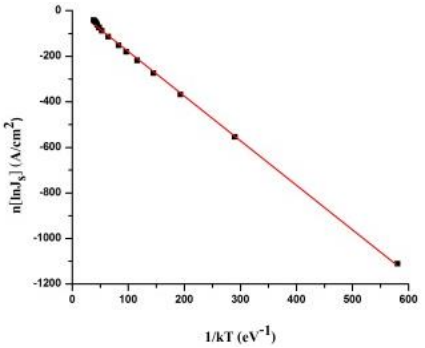


Figure 9 Plot of nlnJ$_s$ vs.1/kT of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction at various temperatures.

The capacitance of the device was measured as a function of applied voltage at a frequency 1 MHz at room temperature. A plot of $1/C^2$ versus reverse bias voltage is shown in Figure 11. Electron concentration of ZnSe layer around 1.36×10^{13} cm^{-3} at 300 K evaluated from the slope of $1/C^2$-V plot. The built-in potential (V_{bi}) having 0.89 V was evaluated from the line intercepts on the voltage axis.

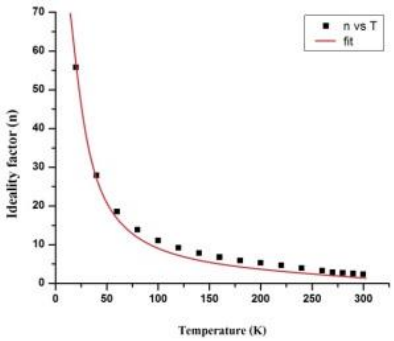


Figure10 Plot of n vs. T of of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction at various temperatures..

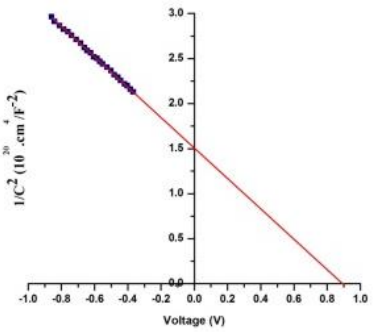


Figure 11 $1/C^2$ – V characteristics of n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction.

CONCLUSION

The n-ZnSe/p-Si (100) heterojunction diode was prepared by thermal evaporating n-ZnSe films on p-Si (100) substrate. The ideality factor and barrier height values of the diode evaluated from TE theory at room temperature are 4.878 and 0.755 V, respectively. The obtained n and Φ_b are

found to be a strong dependence of temperature. The temperature dependence of n suggests that the current conduction mechanism is controlled by the interface states are more pronounced because of the spatial distribution of the interfacial layer between n-ZnSe and p-Si(100). The carrier concentration of ZnSe thin films about 1.36×10^{13} cm^{-3} and the built-in potential (V_{bi}) having 0.89 V are evaluated from the plot of C^{-2} vs. V at the room temperature.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Assist. Prof. Dr. C. Poo-Rakkiat for useful discussion. This work was supported by Faculty of Science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).

REFERENCES

Ivashchenko, M.M., I.P. Buryk, A.S. Opanasyuk, D. Nam, H. Cheong, Ja.G. Vaziev and V.V. Bibyk. 2015. Influence of deposition conditions on morphological, structural, optical and electro-physical properties of ZnSe films obtained by close-spaced vacuum sublimation. **Materials Science in Semiconductor Processing**. 36:13-19.

Mangalaraj, D., S. Venkatachalam, Sa.K. Narayandass,S. Velumani, P. Schabes-Retchkiman and J.A. Ascencio. 2007.Structural studies on vacuum evaporated ZnSe/ p-Si Schottky diodes. **Materials Chemistry and Physics**. 103 : 305–311.

Gao, F., Xiao-Jing Liu, J.S. Zhang, M.Z. Song and N. Li. 2012. Photovoltaic properties of the p-CuO/n-Si heterojunction prepared through reactive magnetron sputtering. **Journal of Applied Physics**.111, 084507.

El-Nahass, M.M., H.S. Soliman, A.A.M. Farag and N.M. Khosifan. 2008. Electrical transport mechanisms and photovoltaic characterization of cobalt phthalocyanine on silicon heterojunctions. **Thin Solid Films**. 516 : 8678–8683.

Altindal, S., H. Kanbur, D.E. Yildiz and M. Parlak . 2007. Current conduction mechanism in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer at low temperatures. **Applied Surface Science**. 253 : 5056-5061.

Bayhan,H. and A.S. Kavasoglu, Tunneling enhanced recombinationin polycrystalline CdS/CdTe and CdS/Cu(In,Ga)Se_2 heterojunction solar cells. 2005. **Solid-State Electronics**. 49 : 991-996.

การวิเคราะห์การแสดงออกของยีนในสบู่ดำภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง

Expression analysis of waterlogging responsive genes in *Jatropha curcas* L.

รัชนีภรณ์ พิมพ์จันทร์[1]และ ปิยะดา จันทวงศ์[1*]

Ratchaneeporn Pimjan[1] and Piyada Juntawong[1*]

บทคัดย่อ

สบู่ดำ(*Jatropha curcas* L.) เป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญ ในหลายปีที่ผ่านมาพืชชนิดนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากในเมล็ดมีปริมาณน้ำมันสูงและมีคุณภาพ จากการศึกษาก่อนหน้าพบว่าสบู่ดำเป็นพืชที่ไม่ทนต่อสภาวะน้ำท่วมขัง โดยพบว่าสภาวะน้ำท่วมขังส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและปริมาณผลผลิต ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ และปริมาณคาร์โบไฮเดรตในรากของสบู่ดำที่อยู่ในสภาวะน้ำท่วมขังเป็นเวลา 1 วัน และ 5 วัน พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ และปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงหลังจากที่เกิดสภาวะน้ำท่วมขัง และยังพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (*ADH*และ *LDH)*เอ็นไซม์ที่สังเคราะห์กรดอะมิโน (*AlAT*และ *GAD)* และ Nitrate reductase(*NR*) นอกจากนี้ยังศึกษาการแสดงออกของ AP2 transcription factor คือ Ethylene Responsive Factor VII(*JcERFVII-1JcERFVII-2*และ*JcERFVII-3*)ซึ่งจากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่ายีนในกลุ่มนี้เกี่ยวกับการตอบสนองต่อสภาวะการมีออกซิเจนต่ำในพืชโมเดลอะราบิดอปซิส จากการศึกษาพบว่าการเกิดน้ำท่วมขังกระตุ้นให้มีการแสดงออกของยีน *ERFVII* ในสบู่ดำ

ABSTRACT

Jatropha (*Jatropha curcas* L.) is a potential biofuel crop. In recent years, it has received special attention because its high seed-oil content and quality. However, Jatropha is sensitive to waterlogging stress, which can affect plant growth and yield. This study was designed to analyze the effects of 1 day and 5 day waterlogging stress.The chlorophyll content and carbohydrate content decreased after 1 day of waterlogging. Waterlogging induced accumulation of mRNAs encoding for anaerobic respiration (*ADH* and *LDH*), amino acid synthesis enzymes (*AlAT* and *GAD*) and Nitrate reductase (*NR*). In addition, we also examined expression of a conserved AP2 transcription factor, namely Ethylene Responsive Factor VII (*JcERFVII-1*, *JcERFVII-2* and *JcERFVII-3*). Previous studies have shown that these genes involved in low oxygen response in *Arabidopsis thaliana*. We found that waterlogging stress could induce the expression of *ERFVII*.

Key Words: *Jatropha curcas* L.,waterlogging stress, chlorophyll content, carbohydrate content, gene expression

*Corresponding author; e-mail address: **pjuntawong@gmail.com**

[1]ภาควิชาพันธุศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Genetics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

สบู่ดำ (*Jatropha curcas*) เป็นพืชน้ำมันที่มีต้นกำเนิดมาจากอเมริกาใต้ แต่ในอดีตนั้นพืชชนิดนี้ยังไม่ได้รับการสนใจมากนัก เนื่องจากยังไม่มีความรู้เรื่องการใช้ประโยชน์จากสบู่ดำเท่าที่ควร เมื่อหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยพบกับสภาวะราคาน้ำมันแพง จึงทำให้ทั้งหน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน รวมถึงเกษตรกรหันมาสนใจพืชน้ำมันอย่างสบู่ดำมากขึ้น (วารสารรักษ์พลังงาน, 2551) สบู่ดำเป็นพืชที่ปลูกง่าย โตเร็ว สามารถปลูกได้ทั่วประเทศไทย เป็นพืชที่ทนต่อสภาวะแห้งแล้งได้ดี และเมล็ดของสบู่ดำสามารถให้น้ำมันได้ปริมาณสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ แต่ปัญหาที่พบในการปลูกสบู่ดำ คือสบู่ดำเป็นพืชที่ไม่สามารถทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเกษตรกรทำให้ไม่สามารถปลูกสบู่ดำได้ ในพื้นที่ที่มีการระบายน้ำไม่ดี หรือพื้นที่ที่ถูกน้ำท่วมบ่อยครั้ง ซึ่งปัญหาน้ำท่วมจะเกิดขึ้นในช่วงฝนตกหนักเป็นเวลานาน และการเกิดน้ำท่วมขังจะกระตุ้นให้เกิดสภาวะออกซิเจนในดินต่ำ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตของพืช งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทางสรีรวิทยาของสบู่ดำเมื่ออยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง โดยการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์จากเนื้อเยื่อใบของสบู่ดำ และวัดปริมาณคาร์โบไฮเดรตจากเนื้อเยื่อรากของสบู่ดำ และศึกษาการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration) โดยศึกษากลุ่มยีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมัก (fermentation)ได้แก่ Alcohol dehydrogenase (*ADH*) และLactate dehydrogenase (*LDH*) และยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดอะมิโน และกระบวนการเมตาบอลิซึมของไนเตรต ได้แก่ Alanine aminotransferase (*AlAT*), Glutamate decarboxylase (*GAD*)และNitrate reductase (*NR*) และได้ศึกษาการแสดงออกของยีน Ethylene Responsive Factor VII ได้แก่(*JcERFVII-1*, *JcERFVII-2*และ*JcERFVII-3*) ซึ่งเป็น transcription factor ที่มีรายการก่อนหน้านี้ว่ามีหน้าที่ในการควบคุมการตอบสนองต่อสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำและน้ำท่วมขังในพืชโมเดลอะราบิดอปซิส (*Arabidopsis thaliana*)(Jofuku*et al*., 1994, Sakuma *et al*., 2002 andLicause*t al*.,2014) และในข้าว (*Oryza sativa*) (Hattori *et al*., 2009 and Niroula*et al*., 2012) และงานวิจัยในสบู่ดำก่อนหน้านี้ได้รายงานว่าพบกลุ่มยีน Ethylene Responsive Factor (*ERF*) กลุ่มที่ 7 ของสบู่ดำมีสมาชิกทั้งหมด 3 ตัว ได้แก่ *JcERFVII-1,* *JcERFVII-2*และ*JcERFVII-3* ซึ่งพบว่ายีน *JcERFVII-2*และ *JcERFVII-3* มีการแสดงออกเพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิดสภาวะน้ำท่วมขังในสบู่ดำ (Juntawong*et al*., 2014)

การศึกษาครั้งนี้จะทราบลักษณะทางสรีรวิทยาของสบู่ดำและการแสดงออกของยีนเมื่อสบู่ดำอยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง และมีแนวคิดที่จะสามารถนำยีนที่ทำการศึกษามาช่วยในการปรับปรุงพันธุ์สบู่ดำให้ทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้โดยใช้เทคโนโลยีทางพันธุวิศวกรรมซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าอาจจะสามารถช่วยพัฒนาสายพันธุ์ของสบู่ดำให้มีความทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การปลูกสบู่ดำและเตรียมตัวอย่างเนื้อเยื่อ

ปลูกเมล็ดสบู่ดำใส่ถุงดำโดยมีอัตราส่วนของวัสดุปลูกดังนี้ 50% (V/V) พีทมอส 25% (V/V) เพอร์ไลต์ และ 25% (V/V) กาบมะพร้าวโดยทำการรดน้ำวันเว้นวัน และใส่สารอาหารพืชไฮโดรโปนิกส์ สัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยให้สบู่ดำมีการเจริญเติบโตประมาณ 4 สัปดาห์จากนั้นทำการทดลองโดยนำต้นสบู่ดำ 6 ต้น ใส่ภาชนะโดยทำการทดลอง 3 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ ซึ่งประกอบด้วย การทดลองที่ 1 เป็นชุดควบคุมคือ 0 วัน และการทดลองที่ 2 และ3 เติมน้ำใส่ภาชนะให้ท่วมโคนต้นใช้เวลา 1 วัน และ5 วัน จากนั้นเก็บตัวอย่างราก

ใบ ก้านใบ และยอดอ่อน ตามวันที่กำหนด และเก็บเนื้อเยื่อทั้งหมด4ชนิด แช่ไนโตรเจนเหลว จากนั้นบดตัวอย่างเนื้อเยื่อทั้งหมดโดยใช้ไนโตรเจนเหลว และเก็บตัวอย่างเนื้อเยื่อที่บดไว้ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส

การวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบสบู่ดำ

ชั่งตัวอย่างเนื้อเยื่อของใบสบู่ดำที่บดด้วยไนโตรเจนเหลว ประมาณ 0.1 กรัม ใส่ในหลอด 15ml เติม 100% methanol 6ml จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ 20,000x*g*ที่ 4 องศาเซลเซียส 25 นาที ดูดสารละลายตัวอย่าง 1 ml จากนั้นนำไปวัด OD ที่ 652และ665 นาโนเมตร

การวัดปริมาณคาร์โบไฮเดรตในรากสบู่ดำ

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างรากที่บดด้วยไนโตรเจนเหลว ประมาณ 0.1 กรัม ใส่ในหลอด 15 ml เติม 2.5 M HCL 5 ml แล้วให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็น เติม Sodium carbonate จนกว่าสารละลายจะไม่มีฟองเกิดขึ้น จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ 12,000x*g*นาน 5 นาที ดูดสารละลายตัวอย่าง 300 µl และเติมน้ำ 700 µl ใส่หลอดใหม่ จากนั้นเตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ1mg/ml จาก 10x stock (glucose 0.1 g ในน้ำ 100 ml) และเติม Anthrone reagent 4 ml(เตรียม 95% (V/V) H_2SO_4 100ml จากนั้นเติมAnthrone reagent0.2g แช่ที่ 4 องศาเซลเซียส) ทั้งในสารละลายตัวอย่าง และสารละลายกลูโคสมาตรฐานแล้วนำไปให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส นาน 8 นาที จากนั้นนำไปวัด OD ที่ 630 นาโนเมตร

การแยกอาร์เอ็นเอของเนื้อเยื่อสบู่ดำ

การแยกอาร์เอ็นเอจากเนื้อเยื่อของสบู่ดำ โดยนำเนื้อเยื่อตัวอย่างของสบู่ดำที่บดให้เป็นผงประมาณ 0.2-0.4 กรัม ใส่หลอด 1.5ml เติม RNA extraction buffer 750µl (0.25 M Nacl,0.05 M Tris-HCL (pH7.5or pH 8.0), 0.02 M EDTA (pH 8.0), 1% (W/V) SDS 4%(W/V), PVP 0.4 M ß-mecaptoethanolและdouble-distilled water (ddH_2O) และเติม Phenol/Chloroform (1:1) 750µl พลิกหลอดกลับไปมา ทิ้งไว้อุณหภูมิห้อง 5 นาที ปั่นเหวี่ยง 12,000x*g* ที่ 4 องศาเซลเซียส 20 นาที ดูดส่วนใสใส่หลอด 1.5ml หลอดใหม่ เติม 1M Glacial Acetic acid 150µl และเติม 100% (V/V)Isopropanol 525µl พลิกหลอดกลับไปมา และเก็บที่ -20 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ปั่นเหวี่ยง 13500x*g* ที่ 4 องศาเซลเซียส 45 นาที จะเห็นตะกอนติดบริเวณก้นหลอด นำส่วนใสทิ้ง เติม 75% (V/V)Ethanol 1ml และปั่นเหวี่ยง 7,500x*g* ที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที ทิ้งสารละลายเหลือแต่ตะกอนตั้งทิ้งไว้อุณหภูมิห้อง 5 นาที เติม UltraPure DEPC-treated Water30µlและทำความสะอาดอาร์เอ็นเอผ่าน column โดยใช้ GF-1Total RNA Extraction Kit (Vivantis, Malaysia)จากนั้นวัดความเข้มข้นของอาร์เอ็นเอที่ได้ด้วยเครื่อง Nanodrop Spectrophotometer และเก็บอาร์เอ็นเอที่อุณหภูมิ-80 องศาเซลเซียส

การสังเคราะห์ complementary DNA (cDNA) เพื่อทำการตรวจสอบการแสดงออกยีน

โดยวิธี ProtoScript™ II Reverse Transcriptase ในเครื่องเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอโดยปฏิกิริยาประกอบด้วยอาร์เอ็นเอ 850ng, 50µMoligo $(dT)_{23}$2 µl, 10 mM dNTP 1 µl และเติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรครบ 12µl นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที แล้วนำไปแช่น้ำแข็งทันทีเป็นเวลา 5 นาที เติม 5X ProtoScript II RT Reaction buffer 5µl, 0.1mMDTT 2 µl และProtoScript II Reverse Transcriptase (200 U/µl) 1µl นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที เพื่อทำปฏิกิริยา reverse transcription จากนั้นนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที เพื่อหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์สารละลายที่ได้จะนำไปเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และใช้เป็นดีเอ็นเอต้นแบบในปฏิกิริยาลูกโซ่โพลีเมอเรส

การทำปฏิกิริยาพีซีอาร์เพื่อเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ

ทำปฏิกิริยาพีซีอาร์เพื่อเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอของยีนหลังจากนั้นใช้เครื่องเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอโดยมีส่วนผสมดังนี้ 10X PCR buffer, 2µl dNTP ความเข้มข้น 2.5mM, 2.8µl Forward primer และReverse primer อย่างละ 1 µl โดยใช้ไพรเมอร์ (Table 1)*Taq*DNA Polymerase(5U/µl)0.3µl, cDNA 2µl และddH_2O11 µl ใส่ในหลอดขนาด 200µl ทำปฏิกิริยาพีซีอาร์โดยใช้โปรแกรม 94 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที 1 รอบ ต่อด้วย 94 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาที ใช้อุณหภูมิ Annealing(Table 1)นาน 30 วินาที และ72 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาที จำนวนใช้ตาม(Table 1)ขั้นตอนสุดท้ายที่ 72 องศาเซลเซียส นาน 7 นาที และให้คงอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำผลที่ได้ไปตรวจสอบโดยวิธีอิเล็กโทรโฟรีซิส ในเจลอะกาโรส 1% และตรวจสอบด้วยเครื่อง UV transilluminator

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบสบู่ดำและปริมาณคาร์โบไฮเดรตในรากของสบู่ดำเมื่ออยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง

จากผลการทดลองการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบของสบู่ดำเมื่ออยู่ในสภาวะน้ำท่วมขังที่ 0 วัน1 วัน และ5 วัน พบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยในใบสบู่ดำเท่ากับ21.34, 16.78 และ16.44 µg/ml ตามลำดับ (Figure 1A) ซึ่งพบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงตามวันที่สบู่ดำถูกน้ำท่วมขัง แต่พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยคำนวณจาก one-way ANOVA($p>0.05$)และผลการทดลองการวัดปริมาณคาร์โบไฮเดรตของรากสบู่ดำเมื่ออยู่ในสภาวะน้ำท่วมขังที่0 วัน1 วันและ5 วัน พบว่ามีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเฉลี่ยในรากสบู่ดำเท่ากับ12.10, 10.15 และ8.16 mg glucose/100mgตามลำดับ (Figure 1B)ซึ่งพบว่าในรากของสบู่ดำมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงตามระยะเวลาที่สบู่ดำถูกน้ำท่วมขัง แต่พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยคำนวณจาก one-way ANOVA($p>0.05$)

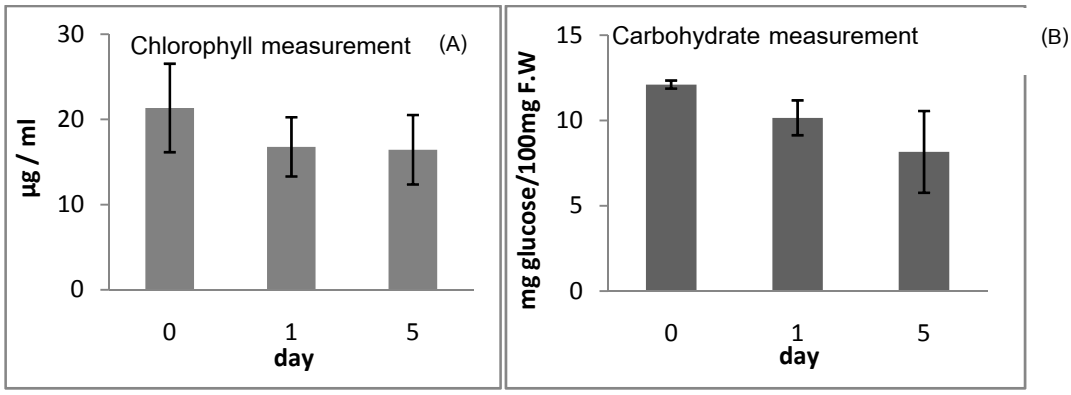


Figure 1. (A) Total leaf chlorophyll content. Data represent mean ± SE (n=3). (B) Total root carbohydratecontent. Data represent mean ± SE (n=3).

การแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อสภาวะน้ำท่วมขังในสบู่ดำ

เมื่อพืชอยู่ในสภาวะน้ำท่วมขังรากจะเปลี่ยนไปใช้กระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) แทนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน แต่จะได้พลังงานน้อยมาก และยังเกิดแอลกอฮอล์ซึ่งจะเป็นพิษต่อเนื้อเยื่อพืช (รวี,2553)และจากการศึกษาการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่ายีน *ADH*และ *LDH* มีการแสดงออกเพิ่มมากที่สุดในเนื้อเยื่อราก เมื่อสบู่ดำถูกน้ำท่วมขังเป็นเวลา 1 วัน และมีการแสดงออกของยีนลดลงในวันที่ 5เมื่อเปรียบเทียบกับวันที่ 1 ส่วนในเนื้อเยื่อใบ ก้านใบ และยอดอ่อน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนทั้งสองยีน (Figure 3A) แสดงให้เห็นว่ายีนดังกล่าวอาจมีหน้าที่เฉพาะในราก ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับผลกระทบโดยตรงกับน้ำท่วมขังเท่านั้นจากการรายงานของMoraesและคณะ (2001)พบว่าการปรับเมตาบอลิซึมของ Alcohol dehydrogenase เป็นสิ่งจำเป็นต่อพืช เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสะสมของแอลกอฮอล์ ซึ่งมีผลกระทบต่อเนื้อเยื่อของพืช และพบว่ากระบวนการที่จะสามารถลดผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้แก่ กระบวนการสังเคราะห์กรดอะมิโน และกระบวนการเมตาบอลิซึมของไนเตรต โดยจะมีกระบวนการสังเคราะห์กรดอะมิโนอะลานีน (Alanine) จากไพรูเวต (Pyruvate)โดยใช้เอนไซม์อะลานีนทรานสเฟอเรส (Alanine Aminotransferase) และกลูทาเมต(Glutamate) ส่งหมู่อะมิโนให้ไพรูเวตโดยใช้เอ็นไซม์กลูตาเมตดีคาร์บอกซีเลส (Glutamate Decarboxylase) โดยไพรูเวตจะเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโนอะลานีนซึ่งกลูตาเมตสังเคราะห์มาจาก NH_4^+และสามารถเปลี่ยนเป็น Oxoglutarateซึ่ง NH_4^+ สังเคราะห์โดยใช้เอนไซม์ไนเตรตรีดักเตส (Nitrate Reductase) (Figure 2) ผลการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดอะมิโน และไนเตรต พบว่ายีน*ALAT* ในเนื้อเยื่อรากมีการแสดงออกของยีนเพิ่มมากที่สุดใน 5 วันเมื่อเปรียบเทียบกับ 0 วัน และ 1 วัน ส่วนในเนื้อเยื่อใบ ก้านใบ และยอดอ่อน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนดังกล่าว การแสดงออกของยีน*GAD*พบว่าในเนื้อเยื่อรากมีการแสดงออกเพิ่มมากในวันที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับ 0 วัน และไม่พบการแสดงออกของยีนในวันที่ 5 ส่วนในเนื้อเยื่อใบ ก้านใบ และยอดอ่อน ไม่พบการแสดงออกของยีน แสดงให้เห็นว่ายีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์กรดอะมิโน อาจมีการทำงานเกี่ยวข้องกับสภาวะน้ำท่วมขังจะเห็นว่ายีนดังกล่าวมีการแสดงออกในรากของสบู่ดำซึ่งเป็นเนื้อเยื่อที่ถูกน้ำท่วมขังโดยตรง การตอบสนองการแสดงออกของยีน *NR*ในเนื้อเยื่อรากมีการแสดงออกของยีนเพิ่มมากที่สุดในวันที่ 1 และมีการแสดงออกของยีนลดลงเมื่อถูกน้ำท่วมขังเป็นเวลา 5 วัน ส่วนในเนื้อเยื่อใบ ก้านใบ และยอดอ่อน พบว่ามีการแสดงออกของยีนลดลงเมื่อเกิดน้ำท่วมขังเป็นเวลานาน (Figure 3B)การแสดงออกของยีน *NR*ที่เพิ่มมากขึ้นภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง อาจเป็นเพราะ denitrifying bacteriaนำไนเตรตในดินไปใช้ จึงทำให้ปริมาณไนเตรตในดินลดลง ส่งผลให้พืชมีการตอบสนองโดยเพิ่มการแสดงออกของยีน *NR*ในราก ในขณะที่เนื้อเยื่อส่วนอื่นๆ มีการแสดงออกของยีน *NR*ลดลง อาจเป็นเพราะปริมาณไนเตรตที่พืชดูดซึมได้จากดินมีไม่เพียงพอ การแสดงออกของยีน Ethylene Responsive Factor VII ซึ่งจากการรายงานก่อนหน้านี้พบว่า ในข้าว (*Oryza sativa*) Ethylene Responsive Factor (*ERF*) กลุ่มที่ 7 ได้แก่ Submergence 1A (*Sub1A*) และSnorkel (*SK*) เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อน้ำท่วมขัง โดย *SK*เกี่ยวข้องกับการยืดของลำต้นข้าวและ*Sub1A*เกี่ยวข้องกับการทนต่อน้ำท่วมขังและการปรับตัวของข้าวเมื่ออยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง (Hattori *et al*., 2009 and Niroula*et al*., 2012) และจากการศึกษากลุ่มยีน Ethylene Responsive Factor (*ERF*) กลุ่มที่ 7 ของ อะราบิดอปซิส (*Arabidopsis thaliana*) ทำหน้าที่ในการตอบสนองต่อสภาวะการขาดออกซิเจนจากการทดลองพบว่ายีน*JcERFVII-2* และ *JcERFVII-3*มีการแสดงออกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดใน 1 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับ 0 วัน สำหรับยีน *JcERFVII-1* พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกในทุกเนื้อเยื่อที่

ทำการตรวจสอบ และพบว่ายีน *JcERFVII-2*มีการแสดงออกของยีนเพิ่มมากขึ้นในเนื้อเยื่อใบ ก้านใบและยอดอ่อน ในขณะที่ยีน *JcERFVII-3*ในเนื้อเยื่ออื่นๆ มีการแสดงออกของยีนลดลงเมื่อถูกน้ำท่วมขังเป็นเวลานาน (Figure 3C) การแสดงออกของยีนทั้งหมดเปรียบเทียบกับยีน house-keeping Ubiquitin (*UBC*) (Figure 3D)

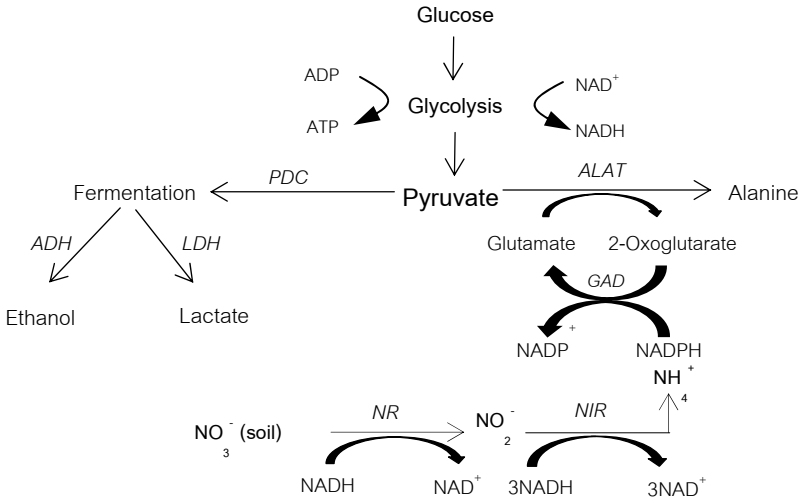


Figure 2. Pathway for glycolysis fermentation and branched-chain amino acid synthesis.

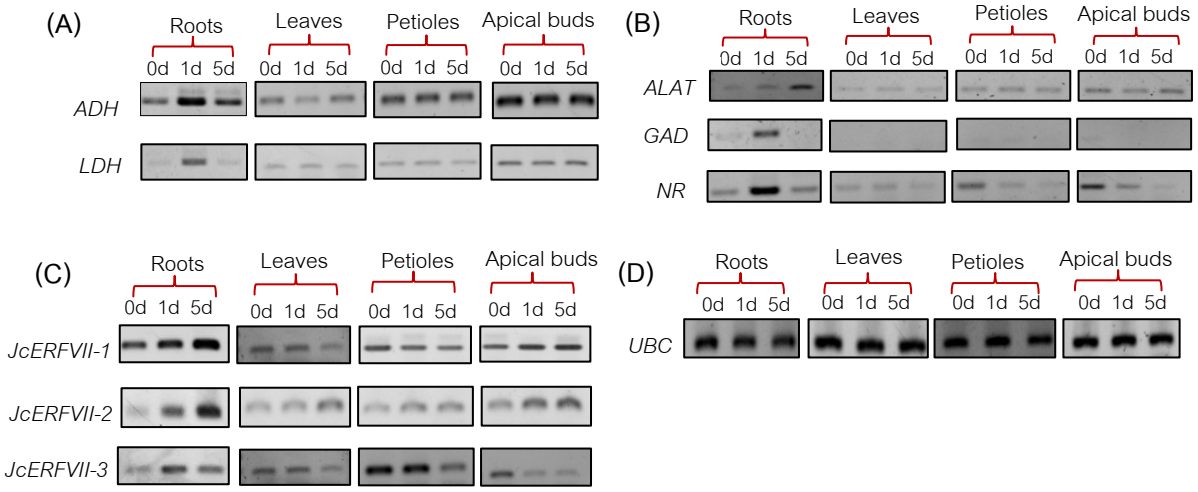


Figure 3. Semi-quantitative RT-PCR displaying differential gene expression in response to waterlogging. (A) Expression analysis offermentative genes (*ADH* and *LDH*).(B)Expression analysis of genes encoding amino acid synthesis enzymes (*ALAT* and *GAD*) and Nitrate reductase (*NR*). (C) Expression analysis of ethylene response factor genes (*JcERFVII-1*, *JcERFVII-2* and*JcERFVII-3*). (D) Expression analysis of house-keeping gene: Ubiquitin (*UBC*). Day (d) indicates time-points of waterlogging stress. Tissues were collected from roots, leaves, petioles and apical buds of 30 day-old plants.

Table 1. Primer sequences used for Semi-quantitative RT-PCR.

Primer name	gene ID	Primer sequence	Annealing temperature	PCR cycle
Alcohol dehydrogenase (*ADH*)-F	Jcr4S02965.20	5'-ATGTCTAGCACAGCCGGTCAG-3'	52 °C	28
Alcohol dehydrogenase (*ADH*)-R	Jcr4S02965.20	5'-CACTCTCCACAATTCCACTAGCTTC-3'		
Alanine aminotransferase (*AlAT*)-F	Jcr4S00131.20	5'-ATGCGGAGATTCGTGATTG-3'	56 °C	30
Alanine aminotransferase (*AlAT*)-R	Jcr4S00131.20	5'-CACACTCCAGAACCTTAGGATTA-3'		
JcERFVII-1-F	Jcr4S00420.40	5'-ATGTGTGGCGGTGCTATCATCTCC-3'	56 °C	25
JcERFVII-1-R	Jcr4S00420.40	5'-GACAGCTGCAGATCCACGAG-3'		
JcERFVII-2-F	Jcr4S00982.160	5'-ATGTGCGGAGGTGCTATTATTTC-3'	56 °C	25
JcERFVII-2-R	Jcr4S00982.160	5'-TCTGTTATCTTCTCCACTTCGTTGAGC-3'		
JcERFVII-3-F	Jcr4S01651.60	5'-ATGTGTGGCGGTGCTATTATAGC-3'	56 °C	25
JcERFVII-3-R	Jcr4S01651.60	5'-TCTCTACTTGCCTATCACCTGAAGC-3'		
Glutamate decarboxylase (*GAD*)-F	Jcr4S00381.20	5'-TCTCGGCTACGAGGGATAC-3'	56 °C	30
Glutamate decarboxylase (*GAD*)-R	Jcr4S00381.20	5'-GCACCGTAATGTGTTGAGC-3'		
Lactate dehydrogenase (*LDH*)-F	Jcr4S00071.210	5'-GTGCAGGCGTTCATTGTTG-3'	56 °C	30
Lactate dehydrogenase (*LDH*)-R	Jcr4S00071.210	5'-GTCTCTAAGTAAAGATCGAGCCAAG-3'		
Nitrate reductase (*NR*)-F	Jcr4S02321.10	5'-ATCCATCGCGTGATATCATATTAG-3'	56 °C	30
Nitrate reductase (*NR*)-R	Jcr4S02321.10	5'-GGCTTATACCACCATGCTTC-3'		
Ubiquitin (*UBC*)-F	Jcr4S00238.120	5'-ATGTCCTCTCCAAGCAAACG-3'	52 °C	30
Ubiquitin (*UBC*)-R	Jcr4S00238.120	5'-AACAGAGCCAGACATTTCATC-3'		

สรุป

จากผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อสบู่ดำอยู่ภายใต้สภาวะน้ำท่วมขังสบู่ดำมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านสรีรวิทยา โดยพบว่ามีปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ และปริมาณคาร์โบไฮเดรตในรากลดลงเมื่อถูกน้ำท่วมขังเป็นเวลานาน 5 วัน และในสภาวะน้ำท่วมขังยังพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน กระบวนการสังเคราะห์กรดอะมิโน และกระบวนการเมตาบอลิซึมของไนเตรตและยังพบว่าการเกิดน้ำท่วมขังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีน *ERFVII* ในสบู่ดำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นางสาวภัทราลักษณ์ ส่งเสริม ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างเพื่อทำงานวิจัยและขอขอบคุณห้องแลป 4612 ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่มอบต้นสบู่ดำเพื่อใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

รวี เสรฐภักดี. 2553. **ต้นไม้ในสภาวะถูกน้ำท่วมขังและแนวทางการแก้ไข**.แหล่งที่มา:http://www.ku.ac.th/flood/chap2.html, 7ตุลาคม2558.

Hattori, Y., K. Nagai, S. Furukawa, X.J. Song, R. Kawano, H. Sakakibara, J. Wu, T. Matsumoto, A. Yoshimura, H. Kitano, M. Matsuoka, H. Mori and M.Ashikari. 2009. The ethylene response factors SNORKEL1 and SNORKEL2 allow rice to adapt to deep water. **Nature** 460: 1026-1030.

Jofuku, K.D., B.G.den Boer, M.V. Montagu and J.K. Okamuro. 1994. Control of Arabidopsis flower and seed development by the homeotic gene APETALA2. **Plant Cell** 6: 1211-1225.

Juntawong, P., A. Sirikhachornkit, R. Pimjan, C. Sonthirod, D. Sangsrakru, T. Yoocha, S Tangphatsornruang and P. Srinives. 2014 Elucidation of the molecular responses to waterlogging in Jatropha roots by transcriptome profiling. **Frontiers in Plant Science**5: 658.

Licausi, F., J.T. van Dongen, B. Giuntoli, G. Novi1, A. Santaniello, P. Geigenberger and P. Perata. 2010 *HRE1* and *HRE2* two hypoxia-inducible ethylene response factors affect anaerobic responses in *Arabidopsis thaliana*. **The Plant Journal** 62: 302–315.

Moraes, M.G.,J.D. Alves., L.E.M.Oliveira., P.F.P.G.Vitorino and M.M.Magalhães. 2001. Characterization of growth and activity of alcohol and lactate dehydrogenase on six herbaceous species under hypoxia. **CiênciaAgrotécnica**25 :86-95.

Niroula, RK., C. Pucciariello, VT. Ho, G. Novi, T. Fukao and P. Perata. 2012 SUB1A-dependent and -independent mechanisms are involved in the flooding tolerance of wild rice species. **The Plant Journal** 72: 282-293.

Sakuma, Y., Q. Liu, J.G. Dubouzet, H. Abe, K. Shinozaki and K.Y. Shinozaki. 2002. DNA-binding specificity of the ERF/AP2 domain of Arabidopsis DREBs, transcription factors involved in dehydration- and cold-inducible gene expression. **BiochemBiophys** 290: 998-1009.

ผลของการปรับสภาพยอดปาล์มน้ำมันโดยการหมักเอนไซลิงซ์ด้วยเชื้อ *Lactobacillus plantarum.*

Effect of Pretreatment on Oil Palm Shoots by Ensiling with *Lactobacillus plantarum.*

อังคณาวิสุ มณีนวล[1]สมพงศ์ โอทอง[2] และนันทรัตน์ พฤกษาพิทักษ์[3*]

Angkanawisu Maneenaun[1], Sompong O-Thong[2]and Nantharat Phruksaphithak[3*]

บทคัดย่อ

เอนไซลิงซ์เป็นวิธีการปรับสภาพชีวมวลทางชีวภาพโดยการใช้เชื้อ *Lactobacillus plantarum*. ที่ OD_{600} ใช้ความเข้มข้นเชื้อ 0.0, 1.0, และ 2.0 ความสามารถในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสจากยอดปาล์มน้ำมันขึ้นอยู่กับน้ำตาลที่ปราศจากความชื้นที่อยู่ในยอดปาล์มน้ำมันและปริมาณแลคโตบาซิลัสแพลนทารัมที่ใช้มีค่าความเป็นกรด 5.2-6.2 โดยขึ้นอยู่กับระดับความชื้น และสูญเสียเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 10 เซลลูโลสร้อยละ 2 ซึ่งแลคโตบาซิลัสแพลนทารัม ที่ (OD_{600} = 1.0) เป็นสภาวะการโหลดที่เพียงพอและมีพีเอชสุดท้าย 4.0 ซึ่งย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 22 เซลลูโลสร้อยละ 5 นอกจากนี้การเพิ่มของ(OD_{600} = 1.0) ที่ 10% w / v ทำให้ได้ปริมาณเซลลูโลสสูงสุดร้อยละ 50.3

ABSTRACT

Ensiling is a wet preservation method that could be used to store and pretreat the biomass. *Lactobacillus plantarum* at loading of 0.0, 1.0 and 2.0 of OD_{600}. The ability to degrade of hemicellulose of oil palm shoots was strongly influenced by both moisture free sugars in oil palm shoots and microbial loading.The addition of *Lactobacillus plantarum*, the pH increased from 5.2 to 6.2, depending on moisture level, and losses of 10% of the hemicellulose and 2% of the cellulose were observed. In contrast, when sufficient *Lactobacillus plantarum* loading (OD_{600}=1.0) were added and interstitial water was maintained, a final pH of 4.0 was attainable, with correspondingly high (22%) hemicellulose degradation and 5% cellulose degradation. The addition of 1.0 of OD_{600} at 10% w/v to palm oil shoot gave the high cellulose content of 50.3%.

Keywords: Ensiling, *Lactobacillus plantarum,* Oil palm shoot.

* Corresponding author; e-mail address:**katenant@gmail.com**

[1]นิสิตปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

[1]Master degree, Department of Biotechnology, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

[2]สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

[2]Department of Biotechnology, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

[3]สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง93210

[3]Department of Chemistry, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกต้นปาล์มน้ำมันเพิ่มมากขึ้นโดยส่วนใหญ่จะปลูกในภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทยอย่างไรก็ตามเมื่อปาล์มน้ำมันมีอายุมากกว่า 25 ปีเกษตรกรจำเป็นจะต้องตัดต้นปาล์มน้ำมันทิ้ง ทั้งนี้เพราะลำต้นมีความสูงเกินไป โดยสูงระหว่าง 7-13 เมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 45-65 เซนติเมตร (Zheng et al., 2010) ทำให้ค่าใช้จ่ายในการเก็บเกี่ยวสูง และมีผลผลิตต่ำจึงไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐกิจ ดังนั้นเกษตรกรจึงตัดทิ้งและเป็นที่แน่นอนในปัจจุบันประเทศไทยจะมีต้นปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นเศษเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนหลายล้านต้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากปริมาณต้นปาล์มน้ำมันที่ไม่ก่อประโยชน์แก่เกษตรกรและยังกลายเป็นปัญหาด้านการจัดการวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรในอนาคตจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการนำวัสดุเหล่านี้มาเพิ่มมูลค่าต่อไป โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของลำต้นปาล์มน้ำมันประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งรวมเรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) (Cowling.,1975) ในกระบวนการย่อยเซลลูโลสของวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลนั้นการทำงานของเอนไซม์/กรดที่ใช้ในการย่อยนั้นมักถูกกีดขวางโดยปัจจัยทางกายภาพ/เคมีหลายประการเป็นผลให้ประสิทธิภาพในย่อยเซลลูโลสลดลงด้วยเหตุนี้จึงต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสให้เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยเสียก่อนโดยอาศัยกระบวนที่เรียกว่าการปรับสภาพ/การพรีทรีตเมนต์ (Pretreatment) ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยน/กำจัดโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆที่เป็นสิ่งกีดขวางต่อกระบวนการย่อยเซลลูโลสส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยดีขึ้นและผลผลิตของน้ำตาลที่ใช้ในการหมักเพิ่มขึ้นดังนั้นการปรับสภาพจึงถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการเปลี่ยนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลกลูโคสวัตถุประสงค์ของกระบวนการปรับสภาพคือกำจัดลิกนิน/เฮมิเซลลูโลสออกลดโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลสและเพิ่มความเป็นรูพรุนของวัตถุดิบการเตรียมเซลลูโลสจากชีวมวลปาล์มน้ำมันโดยกระบวนการหมักทางชีวภาพ เนื่องจากเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์สายตรงของ β-D-glucopyranose ที่เชื่อมต่อกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ด้วยพันธะ B-glycosidic(Sun, et al 2004) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ราคาถูก และมีอยู่จำนวนมากมาทดแทนการใช้พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ลดต้นทุนในการผลิตและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

การหมัก (Ensiling) เป็นกระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ โดยใช้แบคทีเรียแลคติก (LAB) เปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ (WSCs) ไปเป็นกรดอินทรีย์ ส่วนใหญ่กระทำภายใต้การหมักแบบไร้อากาศทำให้ค่าพีเอชลดลง และถือเป็นการถนอมอาหารสัตว์อีกวิธีหนึ่งเพื่อไม่ให้เน่าเสีย

วัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้คือทำการศึกษาผลทางกายภาพในการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยวิธีการเอนไซลิงซ์ของยอดปาล์มน้ำมันที่มีอายุมากกว่า 25 ปี ด้วยเชื้อแลคโตบาซิลัสแพลนทารัม ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเติมเชื้อแลคโตบาซิลัมแพลนทารัมและระยะเวลาในการหมัก

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ยอดปาล์มน้ำมัน (อายุประมาณ 25 ปีขึ้นไปจากจังหวัดกระบี่)
2. ตู้บ่มเชื้อ
3. กระดาษกรอง
4. แท่งแก้วคน
5. ขวดวัดปริมาตร
6. โถดูดความชื้น
7. Fritted glass crucible
8. เครื่องบดลำต้นปาล์ม (Hammer mill)
9. ตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิ
10. กระบอกตวง
11. ถุงพลาสติก
12. จานอาหารเลี้ยงเชื้อ
13. ตะเกียงแอลกอฮอร์
14. อ่างน้ำแข็ง
15. เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)

เตรียมตัวอย่างยอดปาล์มน้ำมัน

ใช้ตัวอย่างยอดปาล์มน้ำมันอายุเก็บเกี่ยวมากกว่า 25 ปีขึ้นไปนำมาบดหยาบให้มีขนาด 2-3 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และจากนั้นนำมาบดละเอียดให้มีขนาด 0.25-0.84มิลลิเมตร นำตัวอย่างไปวิเคราะห์เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (AOAC. 2002) นำตัวอย่างยอดปาล์มน้ำมันใส่ถุงสุญญากาศ และแพ็คในระบบสุญญากาศเป็นจำนวน 50 กรัม นำไประเบิดด้วยไอน้ำที่ ความดัน 1 บาร์เป็นเวลา 15 นาที (โดยมีชุดควบคุมเป็นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำ)

ศึกษาผลการปรับสภาพทางชีวภาพ(Ensiling)

ทำการเลี้ยงเชื้อ *Lactobacillus plantarum.* (จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย)ในอาหาร MRS medium (ประกอบด้วย peptone, Beef extract, Yeast extract, Glucose, Sodium acetate, Tween 80, Dipotassium hydrogen phosphate, Triammonium citrate, Magnesium sulfate, Manganese sulfate) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการบ่มมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร โดยกำหนดที่ความเข้มข้นเชื้อเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่ 2, 1,และ 0 นำแต่ละความเข้มข้นฉีดลงในถุงสุญญากาศเป็นร้อยละ 10 จากนั้นทำการปิดปากถุงด้วยเครื่องซีลสุญญากาศ (Vacuum packer) นำตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างเริ่มต้น และเก็บตัวอย่างทุกวันที่ 7, 14และวันที่21 และหลังการเก็บนำตัวอย่างในแต่ละวันนำตัวอย่างไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ -

20 องศาเซลเซียส และวัดค่าพีเอชคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ (Water Soluble Carbohydrate WSCs) (Anthrone method) วิเคราะห์หากรดทั้งหมด เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (AOAC. 2002)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

โดยทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของยอดปาล์มน้ำมันก่อนทำการปรับสภาพ

Table 1 Chemical composition of fresh oil palm shoots.

Parameter	Percent()
Cellulose	12.27
Hemicelluloses	83.87
Lignin	0.40
Ash	3.53
Moisture content	80
Total solids	27
Volatile Solids	26

ศึกษาลักษณะโดยทั่วไปของการปรับสภาพทางชีวภาพ (Ensiling pretreatment)

ทำการศึกษาระยะเวลาในการหมักเป็นเวลา 21 วัน โดยการหมักจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งค่าพีเอชลดลง คาร์โบไฮเดรตและปริมาณกรดทั้งหมดเพิ่มขึ้นในระหว่างวันที่ 0-7 ของการหมักและพีเอชจะค่อยๆ ลดลงหลังจากวันที่ 7 ดังแสดงในรูปที่ 1 ค่าพีเอชเริ่มต้นของการหมักยอดปาล์มน้ำมันประมาณ 4.0 ในระหว่างวันที่ 0-7 ของการหมักและลดลงหลังจากวันที่ 7-21 เมื่อพีเอชมีค่าลดลงเชื้อแลคโตบาซิลัสแพลนทารัมมีการผลิตกรดแลคติกภายใต้ระบบการหมักแบบไร้อากาศซึ่งในการหมักซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณกรดทั้งหมดในรูปที่ 2 โดยรูปที่3 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ (Water Soluble Carbohydrate WSCs) ของยอดปาล์มน้ำมันในระหว่างการหมัก Ensiling โดยคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ เป็น โมโนแซ็กคาร์ไรด์ (ซูโครส กลูโคสและฟรักโตส) ซึ่งในระหว่างการหมักคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 7 ของการหมักและยังมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่ 14 และเนื่องจากแลคโตบาซิลัสแพลนทารัมใช้แหล่งคาร์โบไฮเดรตในการผลิตกรดแลคติคทำให้หลังจากวันที่ 21 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้จะค่อยๆลดลง

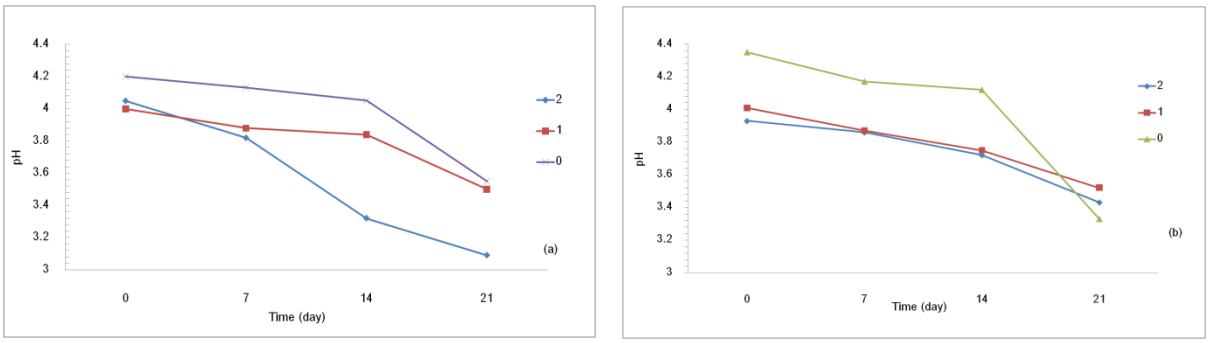


Figure 1 Changes in pH of oil palm shoots after 0, 7, 14 and 21 days of ensilage (a) and without (b) autoclave.

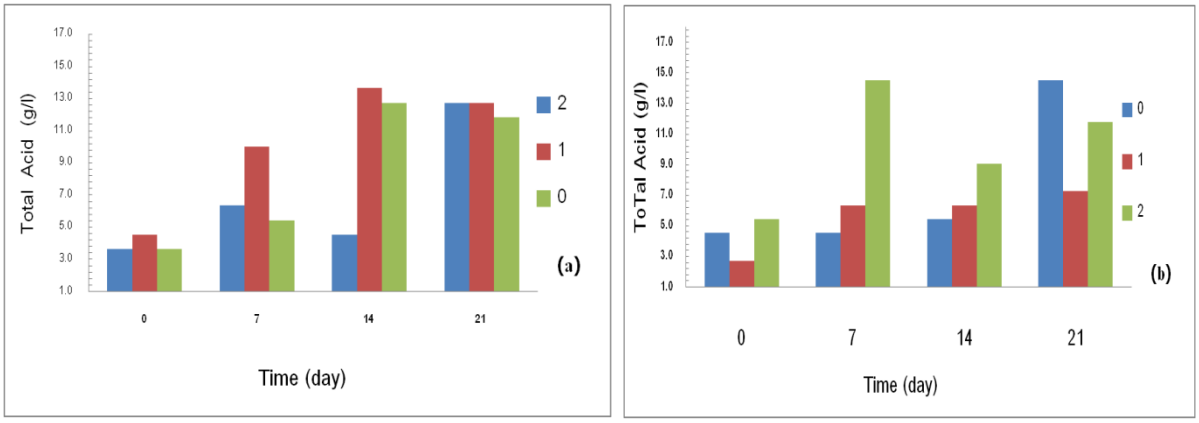


Figure 2 Changes in total acid content of oil shoots after ensiling periods of 0, 7, 14and 21 days with (a) and without (b) autoclave

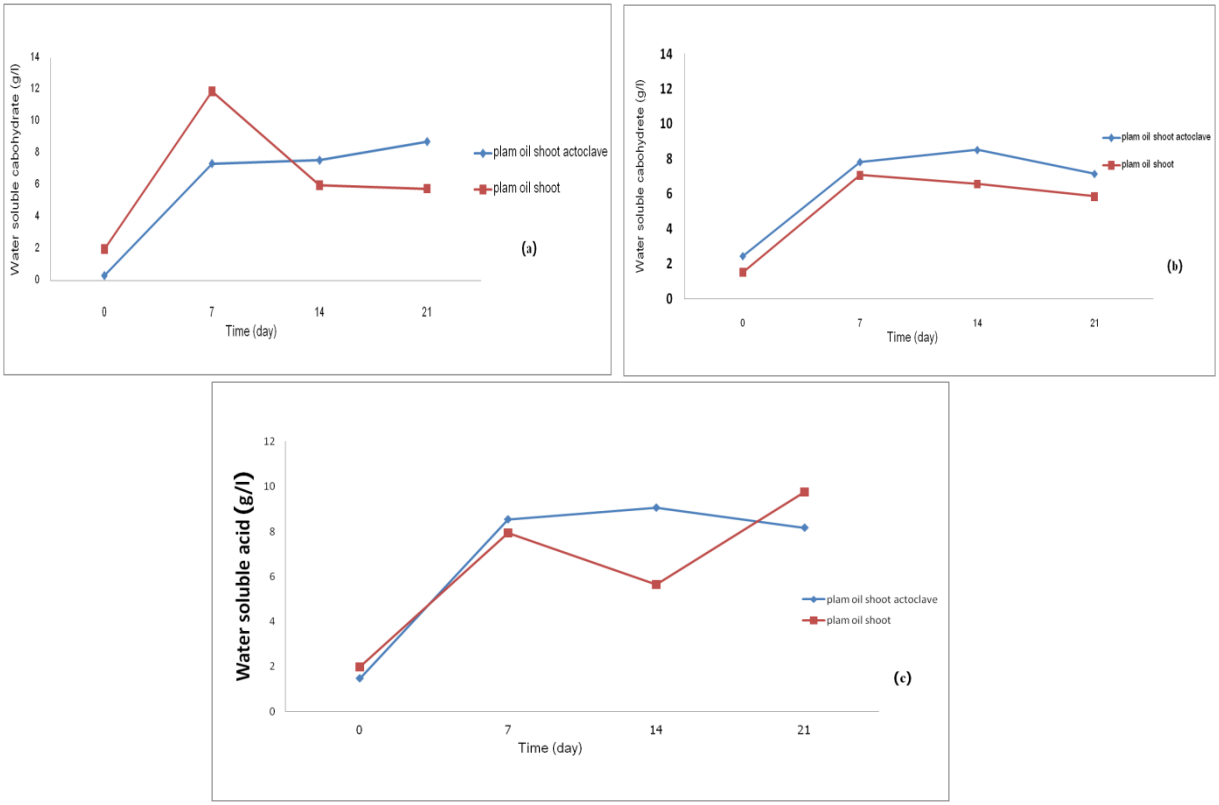


Figure 3 Changes in water soluble carbohydrate of oil palm shoots after ensiling periods of 0, 7, 14 and 21 days with (a)OD_{600} = 2 (b)OD_{600} = 1 (c) OD_{600} = 0

โดยเชื้อแลคโตบาซิลัสแพลนทารัม ย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสของยอดปาล์มน้ำมันโดยการเปลี่ยนเป็นกรดแลกติกหรืออะซิติก และยอดปาล์มน้ำมันที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำมีแนวโน้มในการหมักที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่ายอดปาล์มน้ำมันที่ไม่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำ

ปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในระหว่างการหมัก 21 วัน

ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 19 เป็นร้อยละ 50ในระหว่างการหมัก 14วัน ที่ค่าการดูดกลืนแสง (OD_{600}=1.0) ดังตารางที่ 2 ซึ่งปริมาณเซลลูโลสสูงสุดในวันที่14 ของการหมัก และปริมาณเฮมิเซลลูโลสของการหมักยอดปาล์มน้ำมันลดลงดังตารางที่ 3 และลักษณะของพื้นผิวของลำต้นของยอดปาล์มน้ำมันหลังการหมัก ปริมาณของเฮมิเซลลูโลสที่ค่าการดูดกลืนแสง (OD_{600}=0) ลดลงอย่างรวดเร็วถึงร้อยละ 35-13 และ 8 ในวันที่ 21 ของการหมัก เพราะเส้นใยคาร์โบไฮเดรตสามารถเป็นพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์ใช้ในการเกาะระหว่างการหมักและสภาวะความเป็นกรดของจุลินทรีย์เป็นเหตุผลหลักที่ทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสในระหว่างการหมักลดลง

Table 2. Cellulose content after ensiling.

Concentration of *Lactobacillus plantarum* at OD_{600}	Cellulose (%)		
	7 day	14day	21day
0 + with autoclave	5	13	44
without autoclave	7	36	22
1 + with autoclave	19	50	43
without autoclave	1	41	41
2 + with autoclave	4	44	22
without autoclave	1	31	37

Table 3 Hemicellulose content after ensiling

Concentration of *Lactobacillus plantarum* at OD_{630}	Hemicellulose (%)		
	7 day	14day	21day
0 + with autoclave	35	13	8
without autoclave	35	36	35
1 + with autoclave	33	50	44
without autoclave	33	41	43
2 + with autoclave	36	44	49
without autoclave	30	31	34

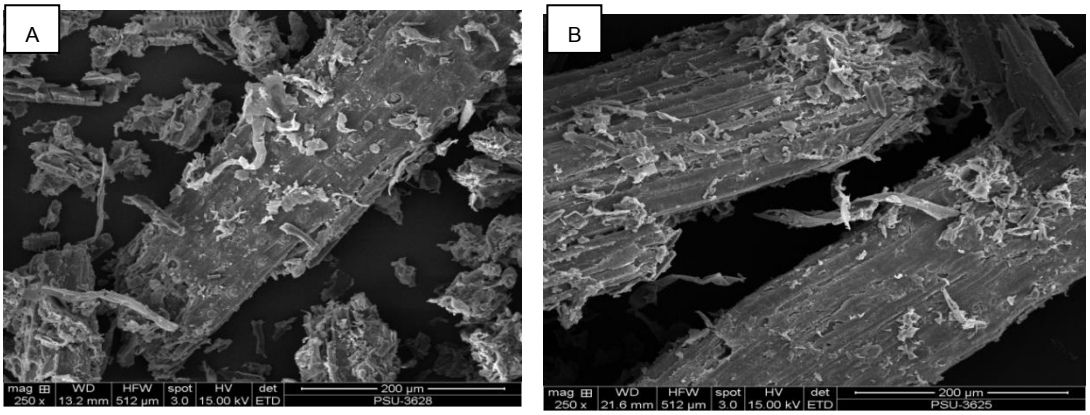


Figure 4 Surface characteristics of oil palm shoots after ensiling for 21 days (A) OD_{600} = 1 (B) OD_{600} = 0

สรุป

การย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสของยอดปาล์มน้ำมันมีอิทธิพลจากน้ำตาลที่ปราศจากความชื้นอย่างมาก และการใช้เชื้อแลคโตบาซิลัมแพลนทารัม ทำให้เกิดการสะสมของกรดแลกติกในการหมักซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าพีเอชลดลงโดยมีการย่อยเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 10 ย่อยสลายเซลลูโลสร้อยละ 2 แต่ในทางกลับกัน แลคโตบาซิลัมแพนทารัมที่ค่าการดูดกลืนแสง (OD_{600}= 1.0) มีระยะเวลาการหมักที่เหมาะสม 14 วัน มีย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 22 และย่อยสลายเซลลูโลสร้อยละ 5 และ ที่ค่าการดูดกลืนแสง (OD_{600}= 1.0) มีความเข้มข้นเชื้อ 10% w/v โดยให้ปริมาณเซลลูโลสสูงสุดร้อยละ 50.3

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน):สวก.ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยและขอขอบคุณหน่วยวิจัยการจัดการทรัพยากรจุลินทรีย์ มหาวิทยาลัยทักษิณ และสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ และเครื่องมือวิจัย

เอกสารอ้างอิง

AOAC 2002. Official methods of analysis (17th ed.). Washington, DC: Association of Official **Analytical Chemists**

Cowling, E. B. 1975. Physical and chemical constraints in the hydrolysis of cellulose and lignocellulosic materials. **Biotechnol.Bioeng.Symp** 5: 163-181.

Hansen J, Møller IB 1975 **AnalBiochem**68: 87-94.

Sun, X.F., R.C. Sun, P. Fowler.and M.S. Baird. 2004. Isolation and characterization of cellulose obtained by a two-stage treatment with organosolv and cyanamide activated hydrogen peroxide from wheat straw.**Carbohydrate Polymers**55: 379-391.

Zheng, P. L. Fang, Y. Xu, J.J. Dong, Y. Ni. and Z.H. Sun. 2010. Succinic acid production from corn stover by simultaneous saccharification and fermentation using Actinobacillussuccinogenes.**Bioresour.Technol**101:7889–7894.

การผลิตเซลลูโลสจากน้ำคั้นยอดปาล์มน้ำมันโค่นทิ้งเพื่อการปลูกใหม่โดยเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086

Cellulose Production from Oil Palm Shoot Juices Felled for Replanting by *Acetobacter xylinum* TISTR 086

เฉลิมเกียรติ แก้วนุ่น[1] สมพงศ์ โอทอง[2] และนันทรัตน์ พฤกษาพิทักษ์[3*]

Chalermkiet Kaewnun[1], Sompong O-Thong[2] and Nantharat Phruksaphithak[3*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้น้ำคั้นยอดปาล์มน้ำมันโค่นทิ้งเพื่อการปลูกใหม่ (OPSJ) เพื่อเป็นสารอาหารในการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) โดยใช้เชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086 โดยพบว่า OPSJ มีน้ำตาลทั้งหมด 53.93 กรัมต่อลิตร ทั้งนี้เมื่อใช้กล้าเชื้อแบคทีเรียที่ 20 ร้อยละโดยปริมาตร สามารถผลิต BC ได้ 4.14 ± 0.08 กรัมต่อลิตร ถูกเลือกใช้ในการศึกษาต่อ ในการทดลองผลิต BC ในอาหารเลี้ยงเชื้อ OPSJ ผสมกับ 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำมะพร้าวให้ผลผลิต BC สูงสุดเท่ากับ 4.70 ± 0.22 กรัมต่อลิตร เมื่อนำ OPSJ ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ที่ความเข้มข้น 650 ยูนิตต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าได้ปริมาณน้ำตาล 73.93 ± 0.12 กรัมต่อลิตร เมื่อนำ OPSJ ที่ผ่านการย่อยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสผสมกับ 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำมะพร้าวสามารถผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสสูงสุดที่ 4.94 ± 0.07 กรัมต่อลิตร ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า OPSJ สามารถเป็นแหล่งอาหารที่เหมาะสมและราคาถูกสำหรับการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลส

ABSTRACT

The possibility of using oil palm shoot juices (OPSJ) as nutrient and carbon source for the bacterial cellulose (BC) production by *Acetobacter xylinum* TISTR 086 was investigated. OPSJ was mainly composed of total sugars (53.93 g/L). The effects of different inoculums on BC production highest yield was obtained at inoculums 20% (v/v) (4.14 ± 0.08 g/L). The highest yield was obtained at OPSJ with coconut juice at mixing ratios 50% (4.70 ± 0.06 g/L). OPSJ was digested with 650 IU/L of enzyme **α**-amylase at concentration enzyme at 37 °C for 24 h the highest sugar concentration of 73.93±0.12 g/L was obtained. OPTS digested by **α**-amylase was mixed with coconut juice gave the highest bacterial cellulose production at OPSJ with coconut juice at mixing ratios 50% (4.94 ± 0.07 g/L). OPSJ was suitable and cheap carbon source for bacterial cellulose production.

Keywords: Bacterial cellulose, *Acetobacter xylinum*, Oil Palm Shoot Juices

* Corresponding author; e-mail address: katenant@gmail.com

[1] นิสิตปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

[1] Master degree, Department of Biotechnology, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

[2] สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

[2] Department of Biotechnology, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

[3] สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

[3] Department of Chemistry, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

คำนำ

เซลลูโลสเป็น Polysaccharide หรือ Carbohydrate-Polymer ที่พบมากในประเทศเขตร้อนโดยเฉพาะที่มีการเจริญเติบโตของพืช ถึงแม้ว่าจะเป็นโครงสร้างหลักของพืช แบคทีเรียก็สามารถที่จะสร้างเซลลูโลสได้ (Tanskul *et al*., 2013) เซลลูโลสจากแบคทีเรีย (Bacterial Cellulose) เป็นวัสดุชีวภาพซึ่งผลิตจากแบคทีเรียโดยมีคุณสมบัติที่น่าพอใจ เช่น มีความบริสุทธิ์สูงปราศจากพวกลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส มีความเป็นผลึกสูง มีระดับความเป็นพอลิเมอร์สูง มีโครงสร้างระดับนาโน มีความต้านทานแรงดึง มีประสิทธิภาพในการจุน้ำสูง และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพได้ดี ทำให้มีการพัฒนาประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมการแพทย์ อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสก็ต้องมีแหล่งคาร์บอนเพื่อใช้ในกระบวนการหมัก เช่น น้ำตาลกลุ่มน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว น้ำตาลโมเลกุลคู่ และแอลกอฮอล์ แต่วัตถุดิบเหล่านี้มักมีราคาแพง และบางครั้งให้ผลผลิตได้ไม่ดีเท่าที่ควรโดยปัญหาเหล่านี้นำไปสู่ต้นทุนที่สูง จึงได้พยายามที่จะผลิตเซลลูโลสจากแบคทีเรียโดยใช้วัตถุดิบทางเลือก เช่น น้ำทิ้งจากการแปรรูปอาหาร กากน้ำตาล น้ำผลไม้ เปลือกข้าว ฟางข้าวสาลี เฮมิเซลลูโลสจากน้ำเสียการหมักสุรา (Hong *et al*., 2012) กากน้ำตาลจากอ้อย กากผลไม้ต่างๆ และพบว่าแหล่งคาร์บอนต่าง ๆ ก็นำไปสู่การเพิ่มผลผลิต และการลดค่าใช้จ่ายทางเศรษฐกิจ

ปาล์มน้ำมันเมื่อครบอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 20- 25 ปี จะต้องตัดทิ้ง เพื่อปลูกทดแทนต้นเดิมหรือปล่อยให้ย่อยสลายไปเองในระยะเวลาที่ยาวนาน คีย์ (Kee. 2004) พบว่าต้นปาล์มน้ำมันจะถูกโค่นทิ้งประมาณ 70 ตันของน้ำหนักแห้งต่อไร่ ทำให้ปัจจุบันประเทศไทยจึงมีปริมาณต้นปาล์มน้ำมันที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเป็นจำนวนมากพร้อมโค่นทิ้งประมาณ 20,000-45,000 ไร่ต่อปี ดังนั้นในแต่ละปีจะมีมวลชีวภาพจากลำต้นปาล์มประมาณ 1 ล้านตันต่อปี (อลิศรา และสมพงศ์. 2552) โดยต้นปาล์มน้ำมันมีเซลล์เก็บน้ำตาล (Sap Cell) ประมาณร้อยละ 70 ของน้ำหนักต้นเมื่อนำไปคั้นสดได้น้ำตาลมีความเข้มข้น 83 กรัมต่อลิตร น้ำคั้นลำต้นปาล์มประกอบด้วยน้ำตาล กลูโคส ซูโครส ฟรุกโตส และกาแลกโตส (Kosugi et al., 2010) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่คาดว่าสามารถนำไปหมักด้วยแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* TISTR 086 ในการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสได้

การศึกษาครั้งนี้มีความสนใจจะศึกษาการใช้ประโยชน์จากน้ำคั้นยอดปาล์มน้ำมันโค่นทิ้งเพื่อการปลูกใหม่ ในการหมักร่วมกับน้ำมะพร้าวเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อหาสภาวะที่เหมาะสมในผลิตเซลลูโลสจากเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086 เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ที่จะใช้ทดแทนแหล่งอาหารที่มีราคาแพงและแหล่งเซลลูโลสจากพืชที่ใช้ระยะเวลาในการผลิตนานกว่าการผลิตจากแบคทีเรียที่ใช้เวลาน้อย และให้ผลผลิตที่มีคุณภาพดีทดแทนการใช้พืชลดการทำลาย ต้นไม้นอกจากนี้อาจช่วยลดภาวะโลกร้อนได้

อุปกรณ์และวิธีการ

เตรียมตัวอย่างน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมัน

นำยอดต้นปาล์มน้ำมันที่ถูกโค่นทิ้งเพื่อการปลูกใหม่ (อายุประมาณ 25 ปี) มาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบด (Hammer Mill) นำมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดใช้วิธี Anthrone Method (Ashwell.1957) และเก็บน้ำคั้นไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปใช้ในการผลิตเซลลูโลสโดยเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086 ต่อไป

ศึกษาปริมาณน้ำตาลของน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ α-Amylase

นำน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันมาใส่ขวดรูปชมพู่ 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เติมเอนไซม์ α-Amylase ที่ความเข้มข้น 0, 130, 390, 650, 910, 1170 และ 1300 ยูนิตต่อลิตร เก็บผลทุก ๆ 6 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดใช้วิธี Anthrone Method (Ashwell. 1957) เลือกความเข้มข้น และชั่วโมงของเอนไซม์ α-Amylase ที่ให้ปริมาณน้ำตาลสูงสุดทำการทดลองผลิตแบคทีเรียเซลลูโลส

ศึกษาการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสของเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086

เริ่มต้นทดสอบความสามารถในการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสกับปริมาณกล้าเชื้อโดยใช้กล้าเชื้อที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 (v/v) เลือกความเข้มข้นที่ผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสได้สูงสุดไปใช้ในการทดลองต่อไป จะผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดดูแรน ขนาด 250 มิลลิมิตร โดยใช้น้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันร่วมกับน้ำมะพร้าวโดยมีการใช้รหัสตัวอย่างเป็น P0(0:100), P90(90:10), P80(80:20), P70(70:30), P60(60:40), P50(50:50) และ P100(100:0) (%v/v) และใช้น้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันที่ผ่านการย่อยเอนไซม์ α-Amylase ที่ความเข้มข้นและเวลาที่ให้ผลของน้ำตาลมากที่สุดหมักร่วมกับน้ำมะพร้าวโดยมีการใช้รหัสตัวอย่างเป็น EP0(0:100), EP90(90:10), EP80(80:20), EP70(70:30), EP60(60:40), EP50(50:50) และ EP100(100:0) (%v/v) ปรับ pH เท่ากับ 4 ด้วย Acetic Acid นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที เติมเชื้อแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* TISTR 086 ที่ปริมาณเชื้อตั้งต้นที่ผลิตเซลลูโลสได้ดีที่สุด บ่มทิ้งไว้เลี้ยงเชื้อบ่มในสภาวะนิ่ง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในสถานที่ที่ไม่มีมดหรือแมลงหวี่ ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 วัน ควรมาตรวจดูการปนเปื้อนจากเชื้อราทุกๆ 2 วัน หากพบการปนเปื้อนให้กำจัดทิ้ง เมื่อบ่มเสร็จจะมีแผ่นวุ้นแบคทีเรียเซลลูโลสที่ผิวหน้าอาหารและจะมีการผลิตกรดอะซิติกขึ้น

ทำบริสุทธิ์เซลลูโลสที่ได้จากเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086

หลังจากการผลิตเซลลูโลสจากแบคทีเรียแล้ว นำแผ่นเซลลูโลสมาตัดเป็นชิ้นเหมือนลูกเต๋านำมาต้มเดือดด้วยน้ำกลั่นจนกว่า pH ประมาณ 7 แล้วต้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดเซลล์ที่เจือปนออก นำชิ้นของเซลลูโลสจากแบคทีเรียมาต้มด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งเพื่อกำจัดส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อและสารตกค้างอื่นออก จนได้เซลลูโลสสีใสที่ pH ประมาณ 7 สุดท้ายเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่บริสุทธิ์ถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อบไว้จนกว่าจะแห้งและได้น้ำหนักที่คงที่

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโทมิเตอร์ (Fourier Transforms Infrared Spectrometry ; FT-IR)

เซลลูโลสจากแบคทีเรียบริสุทธิ์จะถูกวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transforms Infrared Spectrometer ในโหมด Attenuated Total Reflectance (ATR) เพื่อยืนยันโครงสร้างของเซลลูโลสโดยต้องนำแบคทีเรียเซลลูโลสที่อบแห้งไว้ นำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนกว่าแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสจะมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างมาวางบนกระจก ZnSe แล้วทำการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 4000-650 เซนติเมตร โดยมีความละเอียดของการวิเคราะห์ (Scan) เท่ากับ 16 รอบและความละเอียดของการวิเคราะห์เท่ากับ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของปริมาณน้ำตาลของน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ α-Amylase

จากการศึกษาการย่อยน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันด้วยเอนไซม์ที่ความเข้มข้นต่างกัน ซึ่งทดลองโดยเลือกตัวอย่างที่มีการย่อยเป็นเวลา 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 และ 48 ชั่วโมง พบว่าการย่อยน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันด้วยเอนไซม์ ที่ความเข้มข้นของเอนไซม์ 650 ยูนิตต่อลิตร ให้ผลของน้ำตาลทั้งหมดได้ดีที่สุด และเมื่อมาดูระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยพบว่าที่ 24 ชั่วโมง จะมีค่าความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดมากที่สุดที่ 73.93 กรัมต่อลิตร รองลงมาคือชั่วโมงที่ 30 และ 36 ตามลำดับ (Figure 1)เมื่อใช้ความเข้มข้นปริมาณของเอนไซม์ต่อซับสเตรดมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ไม่เหมาะสม อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากไม่มีเอนไซม์และซับสเตรดเหลือพอที่จะทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเคมีอาจหยุดชะงัดได้ด้วยสารประเภทหนึ่งที่เราเรียกว่า “ตัวยับยั้งเอนไซม์” ทั้งนี้การย่อยน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันด้วยเอนไซม์ ซึ่งใช้เอนไซม์ α-Amylase ช่วยในการย่อยสลายกลุ่มแป้งที่อยู่ในน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันเพื่อเลือกตัวอย่างที่มีการย่อยได้ปริมาณน้ำตาลดีที่สุดใช้เป็นแหล่งอาหารเลี้ยงเชื้อในการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลส

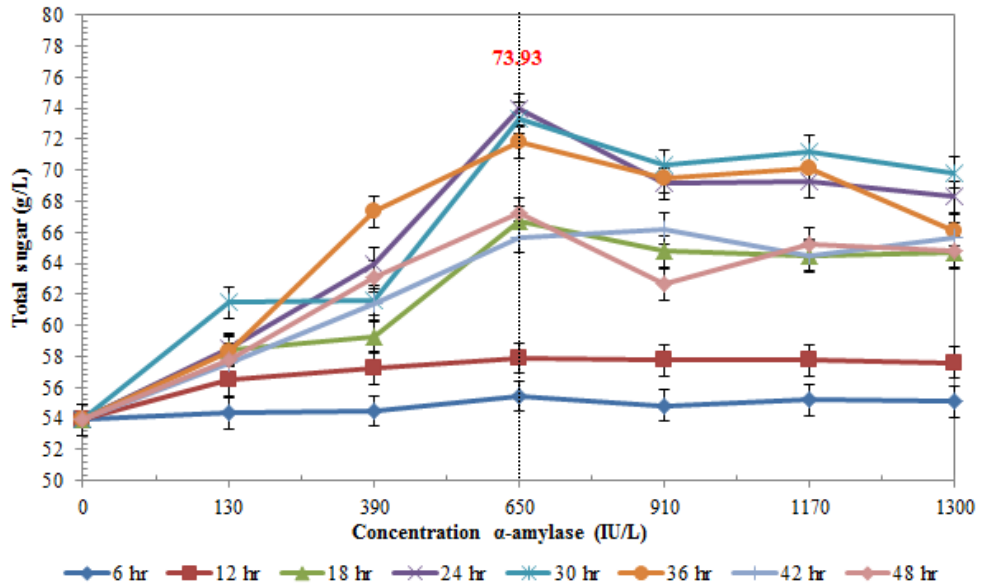


Figure 1 The total sugar contents obtained from various concentration of enzyme α-amylase and digestion time.

ผลของการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสของเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086

จากการศึกษาผลของปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้นที่เหมาะสมในการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสโดยใช้หัวเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086 ที่ 10, 20 และ 30 % บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 วัน พบว่าปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้นจะมีผลต่อการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสโดยความหนาและน้ำหนัก โดยพบว่าที่หัวเชื้อ 20% จะให้ผลในการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสมากที่สุดที่ 4.14±0.12 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาตรหัวเชื้อเป็น 30% จะทำให้การผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสลดลง ดังนั้นปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้นที่เหมาะสมในผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสคือ 20 % (Table 1) หากมีการใช้เชื้อเริ่มต้นในปริมาณมากกว่านี้จะทำให้การผลิตเซลลูโลสของเชื้อลดลง และพบว่าจำนวนเซลล์

แบคทีเรียจะหนาแน่นมากเกินไป ทำให้เกิดภาวะการแข่งขัน ทำให้มีการผลิตเซลลูโลสลดลง (พันทิพา โพธิ์วัน. 2547).

Table 1 Results of inoculums in different rates for yields of production.

Inoculums	Initial sugar (g/L)	Final sugar (g/L)	Initial pH	Final pH	Thickness of BC(mm)	BC (g/l)	Yield (g BC/g Sugar
10%	84.39	45.15	4.50	3.62	18.4±0.11	3.59±0.11	0.0425± 0.003
20%	84.39	43.72	4.50	3.48	21.7±0.14	4.14±0.12	0.0490±0.001
30%	84.39	49.29	4.50	3.42	18.8±0.13	3.46±0.15	0.0410±0.001

จากการศึกษาการผลิตเซลลูโลสด้วยเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086 ในอาหารเลี้ยงเชื้อร่วมของน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันกับน้ำมะพร้าวที่อัตราส่วน P100 (100:0), P90 (90:10), P80 (80:20), P70 (70:30), P60 (60:40), P50 (50:50) และ P0 (0:100) ตามลำดับ และน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์กับน้ำมะพร้าวที่อัตราส่วน EP100 (100:0), EP90 (90:10), EP80 (80:20), EP70 (70:30), EP60 (60:40), EP50 (50:50) และ EP0 (0:100) โดยบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน พบว่าตัวอย่าง P50 (น้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมัน 50 : 50 น้ำมะพร้าว) ให้ผลผลิตเซลลูโลสสูงสุดที่ 4.70 ± 0.22 กรัมต่อลิตร มีค่า Yield เท่ากับ 0.0743 ± 0.001 g Bacterial Cellulose /g Sugar โดยมีความหนา 27.00 มิลลิเมตร และมี pH ที่ลดลงอยู่ที่ 4.18 และในตัวอย่าง EP50 (น้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ α-Amylase ที่ความเข้มข้น 650 IU/L เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 50% : น้ำมะพร้าว 50%) ให้ผลผลิตเซลลูโลสสูงสุดที่ 4.94 ± 0.07 กรัมต่อลิตร มีค่า Yield เท่ากับ 0.0637 ± 0.005 g Bacterial Cellulose /g Sugar โดยมีความหนา 30.75 มิลลิเมตร และมี pH ที่ลดลงอยู่ที่ 3.80 (Table 2, Figure 2) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำคั้นจากยอดปาล์มน้ำมันสามารถเป็นแหล่งอาหารเพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนซึ่งอาจส่งผลต่อการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสได้ และพบว่าค่า pH ก็จะลดลงเมื่อมีการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสเนื่องจากเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086 จะผลิตกรดอะซิติกออกมา

Table 2 Yield of bacterial cellulose production in fermentation media OPSJ and OPSJ was digested with enzyme amylase.

Sample	Initial sugar (g/L)	Final sugar (g/L)	Initial pH	Final pH	Thickness of BC(mm)	BC (g/l)	Yield (g BC/g Sugar)
P100	50.31	10.31	4.50	4.35	19.50±1.06	3.54±0.35	0.0704±0.008
P90	51.33	10.56	4.50	4.31	19.50±1.77	3.56±0.41	0.0694±0.009
P80	53.88	15.56	4.50	4.30	21.00±0.71	3.72±0.13	0.0689±0.002
P70	55.61	14.23	4.50	4.28	23.00±0.00	4.11±0.05	0.0739±0.003
P60	61.48	10.71	4.50	4.23	23.50±0.35	4.11±0.07	0.0669±0.003
P50	63.21	13.42	4.50	4.18	27.00±0.71	4.70±0.22	0.0743±0.001
P0	75.41	17.50	4.50	3.56	24.00±0.71	4.18±0.08	0.0555±0.003

EP100	73.78	32.76	4.50	3.96	23.50±0.70	4.31±0.09	0.0584±0.001
EP90	71.73	30.97	4.50	3.93	25.50±0.70	4.41±0.21	0.0615±0.001
EP80	74.64	30.87	4.50	3.94	24.50±0.70	4.39±0.03	0.0590±0.003
EP70	75.71	32.04	4.50	3.83	25.50±0.70	4.59±0.24	0.0606±0.000
EP60	76.73	27.19	4.50	3.83	26.25±0.35	4.67±0.00	0.0610±0.004
EP50	77.70	27.14	4.50	3.80	30.75±1.06	4.94±0.07	0.0637±0.005
EP0	83.06	20.26	4.50	3.77	24.00±1.41	4.18±0.06	0.0504±0.002

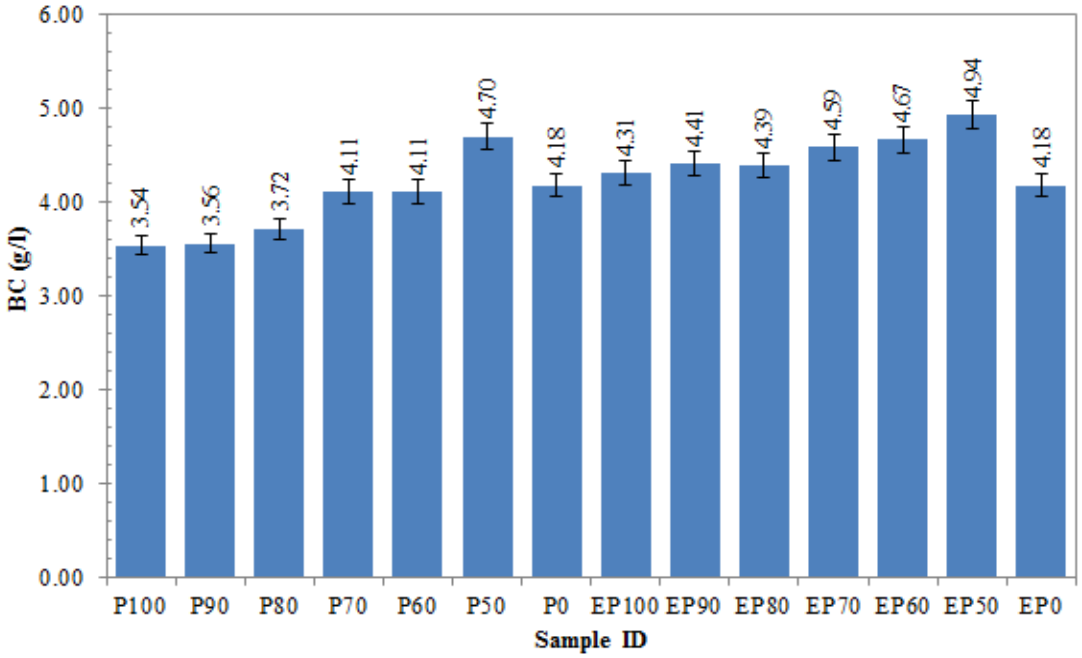


Figure 2 Bacterial cellulose production in fermentation media OPSJ and OPSJ was digested with enzyme amylase.

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโทมิเตอร์ (Fourier Transforms Infrared Spectrometry ; FT-IR)

การพิสูจน์เอกลักษ์ของเซลลูโลสที่ผลิตโดยเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086 ด้วยเครื่อง Fourier Transforms Infrared Spectrometer ในโหมด Attenuated Total Reflectance (ATR) แสดงผลการศึกษาดัง (Figure 3) พบสัญญาณการดูดกลืนที่กว้างในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3000 และ 3600 cm^{-1} ซึ่งแสดงแถบการยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ของหน่วยกลูโคส ซึ่งซ้อนทับกับแถบการยืดของหมู่เมทิล (-CH group) จึงพบสัญญาณการดูดกลืนเล็กน้อยในช่วงความยาวคลื่น 2800 – 2900 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นประมาณ 1076 - 1023 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C-O-C ของ anhydroglucose การดูดกลืนที่ความถี่ประมาณ 1150 cm^{-1} นั้นแสดงถึงพันธะ C-C (Castro *et al.*, 2012)

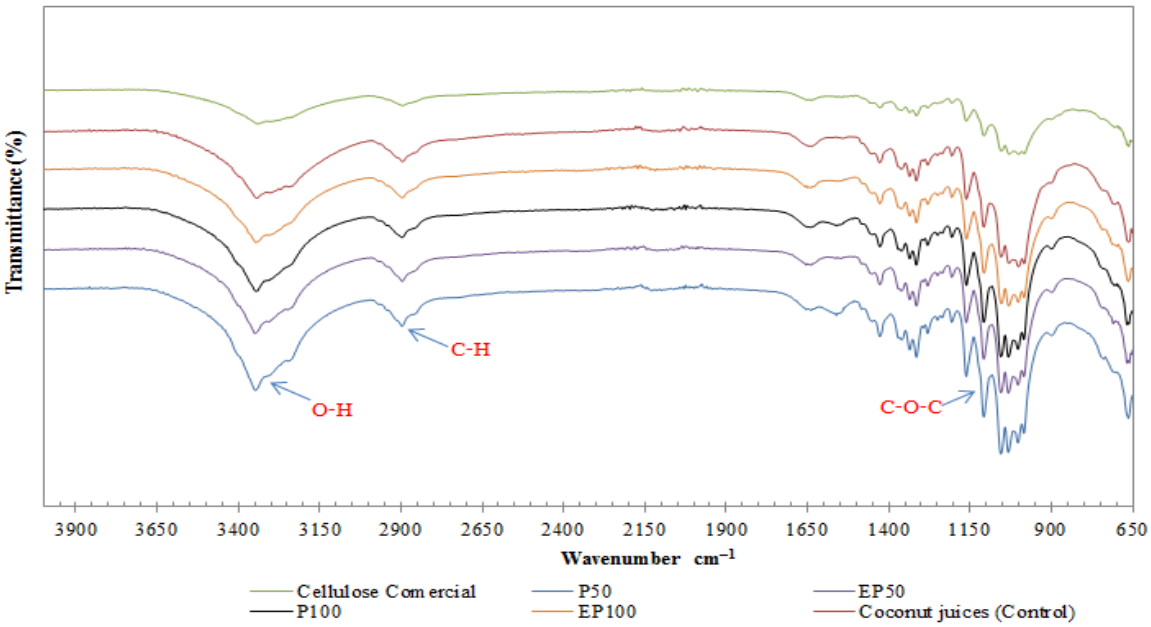


Figure 3 FT-IR spectrum of the BC membrane obtained from OPSJ with coconut juice.

สรุป

น้ำคั้นยอดปาล์มน้ำมันโค่นทิ้งเพื่อการปลูกใหม่ (OPSJ) ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำตาลทั้งหมด 53.93 กรัมต่อลิตร สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารในการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสโดยเชื้อ *Acetobacter xylinum* TISTR 086 ได้ 4.70 ± 0.06 และ 4.94 ± 0.07 กรัมต่อลิตร ดังนั้น OPSJ สามารถเป็นแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมและราคาถูกสำหรับแบคทีเรียเซลลูโลส และงานนี้สามารถใช้ในการศึกษาการผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสเพื่อเป็นวัสดุในการประยุกต์ใช้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบัน วิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยทักษิณ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย และขอขอบคุณหน่วยวิจัยการจักการทรัพยากรจุลินทรีย์ มหาวิทยาลัยทักษิณ และสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือวิจัย

เอกสารอ้างอิง

สมพงศ์ โอทอง และ อลิศรา เรืองแสง. 2552. **การพัฒนากระบวนการผลิตพลังงานชีวภาพจากลำต้นปาล์มอย่างมีประสิทธิภาพ**. รายงานการวิจัยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและภาควิชาชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.

พันทิพา โพธิ์วัน. (2547). **การผลิตเซลลูโลสโดย *Acetobacter Xylinum* ที่อุณหภูมิสูง**. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Castro C., Zuluaga R., Alvarez C., Putaux J., Caro G., Rojas O., Mondragon I. and Ganan P. 2012. "Bacterial cellulose produced by a new acid-resistant strain of *Gluconacetobacter* genus," **Carbohydrate Polymers**. 89 : 1033 – 1037.

Hong F., Guo X., Zhang S., Han S., Yang G. and Jonsson L. 2012. "Bacterial cellulose production from cotton-based waste textiles: Enzymatic saccharification enhanced by ionic liquid pretreatment," **Bioresource Technology**. 104 : 503 – 508.

Kee K.K. (2004). "Nutrient reserves and recycling from oil plam trunk at replanting," In: Proceedings of the Fourth International Crop Science Congress on New Direction For a Diverse Plant, Brisbane, Retrieved May 25,2011,from http://www.regional.org.au/au/asa/2004/poster/2/3/376_keekk.htm

Kosugi A., Tanaka R., Magara K., Murata Y., Arai T., Sulaiman O.,Hashim R., Hamid Z.A.A., Yahya M.K.A., Yusof M.N.M., Ibrahim W.A., and Mori Y. (2010). "Ethanol and lactic acid production using sap squeezed from old oil palm trunks felled for replanting," **Bioscience and Bioengineering**. 110 : 322–325

Tanskul S., Amornthatree K. and Jaturonlak N. (2013). "A new cellulose-producing bacterium, *Rhodococcus* sp. MI 2: Screening and optimization of culture conditions," **Carbohydrate Polymers**. 92 : 421 – 428.

การแยกและการศึกษาคุณสมบัติโปรไบโอติกของแลคติกแอซิดแบคทีเรียจากปลาส้ม

Isolation and Preliminary Determination of Probiotic Properties of Lactic Acid Bacteria from Pla Som

กมลรส กำแพงนิล[1] อรอนงค์ โพธา[1] ชิดชนก ดวงแก้ว[1] **ปาริชาติ พุ่มขจร**[1] พงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ[1*]

Kamonrot Kumpangnil[1], Onanong Potha[1], Chidchanok Duangkaew[1], Parichat Phumkhachorn[1] and Pongsak Rattanachaikunsopon[1*]

บทคัดย่อ

แลคติกแอซิดแบคทีเรียหลายสายพันธุ์มีคุณสมบัติเป็นโปรไบโอติก ซึ่งสามารถส่งเสริมสุขภาพของผู้บริโภคได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติโปรไบโอติก จากการนำแลคติกแอซิดแบคทีเรียจำนวน 10 ไอโซเลต (K1 – K10) ที่แยกได้จากปลาส้มมาทดสอบการทนกรด และเกลือน้ำดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักของโปรไบโอติก พบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 สามารถทนกรดที่ pH เท่ากับ 2 ได้ดีที่สุด และการเจริญของแลคติกแอซิดแบคทีเรียดังกล่าวก็ไม่ถูกกระทบโดยเกลือน้ำดีที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.2% อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 ไม่สามารถยับยั้ง *Escherichia coli* O157:H7 ATCC 43895 และ *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 ได้ เมื่อนำแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 ไปตรวจสอบสายพันธุ์ด้วยวิธี 16S rDNA sequence analysis พบว่าลำดับเบสของ 16S rDNA ของแลคติกแอซิดแบคทีเรียดังกล่าวคล้ายกับลำดับเบสของ 16S rDNA ของ *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strain IL 1403 ด้วยเปอร์เซ็นต์ความคล้ายคลึง (% homology) เท่ากับ 99% แลคติกแอซิดแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติหลักของโปรไบโอติกที่ได้จากการทดลองนี้สามารถนำไปศึกษาต่อเพื่อใช้ประโยชน์ในอนาคต

ABSTRACT

Many strains of lactic acid bacteria have probiotic properties that can promote consumers' health. This study aims to find lactic acid bacteria having probiotic properties. Ten isolates of lactic acid bacteria (K1 – K10) isolated from Pla Som (fermented fish) were tested for their tolerance to acid and to bile salt, major probiotic properties. It was found that lactic acid bacteria K8 was the most tolerant isolate to acid at pH 2 and its growth was not affected by bile salt at the concentration of 0.2%. However, the study showed that lactic acid bacteria K8 did not have antimicrobial ability against *Escherichia coli* O157:H7 ATCC 43895 and *Staphylococcus aureus* ATCC 25923. When lactic acid bacteria K8 was subjected to the identification by using 16S rDNA sequence analysis, it was found that its 16S rDNA sequence showed 99% homology to that of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strain IL 1403. Lactic acid bacteria with major probiotic properties obtained from this study can be further characterized in order to utilize it in the future.

Key Words: lactic acid bacteria, probiotic, pH tolerance, bile salt tolerance

* Corresponding author; e-mail address: **rattanachaikunsopon@yahoo.com**

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190

[1]Department of Biological Science, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190

ไม่สามารถใช้งานเพื่อการค้า

คำนำ

โปรไบโอติก (probiotics) คือ จุลินทรีย์ที่มีชีวิตเมื่อบริโภคไปแล้วก่อให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย ซึ่งอาจช่วยป้องกันหรือรักษาโรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เป็นจุลินทรีย์ประจำถิ่น (normal flora) โดยจุลินทรีย์เหล่านี้มักพบในทางเดินอาหารของคนและสัตว์ นอกจากนี้ยังสามารถพบในอาหาร คุณสมบัติของโปรไบโอติกที่สำคัญที่นิยมใช้ในการจัดจำแนก ได้แก่ ความสามารถในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรค ความสามารถในการทนต่อสภาวะในทางเดินอาหาร เช่น สภาวะความเป็นกรดในกระเพาะอาหาร และสภาวะการมีน้ำดีในลำไส้เล็ก ความสามารถในการยึดเกาะผนังลำไส้ ความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโต ความสามารถในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันร่างกาย เป็นต้น (Ouwehand *et al*., 2002) มีจุลินทรีย์หลากหลายชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นโปรไบโอติก แต่จุลินทรีย์โปรไบโอติกส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดแลคติก (lactic acid bacteria) ตัวอย่างเช่น *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Peddiococcus* นอกจากแบคทีเรียแล้ว ยังมีจุลินทรีย์กลุ่มยีสต์ ได้แก่ *Candida pintoleppesii*, *Saccharomyces cerevisiae* และรา ได้แก่ *Aspergillus niger* และ *Aspergillus oryzae* เป็นต้น (Ljungh and Wadstrom, 2006)

ในปัจจุบันมีการนำจุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเป็นโปรไบโอติกมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางทั้งในด้านอุตสาหกรรมอาหาร ทางด้านการเกษตร และทางด้านการแพทย์ ตัวอย่างของการนำโปรไบโอติกมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้แบคทีเรียโปรไบโอติกในรูปแบบที่เป็นส่วนผสมอาหารเสริมแบบแคปซูล เป็นผงผสมกับเครื่องดื่ม และลูกอม การเติมโปรไบโอติกเข้าไปเพื่อให้อาหารดังกล่าวมีประโยชน์ต่อสุขภาพร่างกาย (Mugambi *et al*., 2014) การนำโปรไบโอติกมาใช้ในการเกษตร เช่น การนำโปรไบโอติกไปผสมในอาหารเลี้ยงสัตว์เพื่อเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและส่งเสริมระบบภูมิคุ้มกันของสัตว์ (Rattanachaikunsopon and Phumkhachorn, 2010) ส่วนการนำโปรไบโอติกมาใช้ทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นพาหะนำดีเอ็นเอวัคซีน (DNA vaccine delivery vehicle) เข้าสู่ร่างกายคนและสัตว์เพื่อไปกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย (Medina *et al*., 2010)

จากประโยชน์ของโปรไบโอติกที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้การศึกษานี้มุ่งเน้นที่จะแยกแลคติกแอซิดแบคทีเรียจากอาหาร และทดสอบความสามารถในการเป็นโปรไบโอติกของแลคติดแอซิดแบคทีเรียดังกล่าว โปรไบโอติกที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปศึกษาต่อเพื่อใช้ประโยชน์ในอนาคตไม่ว่าจะเป็นในด้านอุตสาหกรรมอาหาร ทางด้านการเกษตร หรือทางด้านการแพทย์

อุปกรณ์และวิธีการ

อาหารหมักที่ใช้ในการแยกและคัดเลือกแลคติกแอซิดแบคทีเรีย

อาหารหมักที่ใช้ในการแยกและคัดเลือกแลคติกแอซิดแบคทีเรีย ได้แก่ ปลาส้ม ซึ่งได้จากตลาดวารินเจริญศรี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี

จุลินทรีย์ทดสอบ

จุลินทรีย์ก่อโรคที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (antimicobial activity) ที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ *Escherichia coli* O157:H7 ATCC 43895 และ *Staphylococcus aureus* ATCC 25923

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

การแยกและคัดเลือกแลคติกแอซิดแบคทีเรียจากอาหารหมัก

การแยกและคัดเลือกแลคติกแอซิดแบคทีเรียจากตัวอย่างอาหารหมัก มีขั้นตอนดังนี้ ชั่งตัวอย่างอาหาร 5 กรัม ใส่ในสารละลาย 0.85% (w/v) NaCl ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน นำเฉพาะส่วนน้ำมาเจือจางที่ระดับความเจือจาง 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5} และ 10^{-6} นำทุกความเจือจางมาทำการ spread plate บนอาหาร MRS agar นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการคัดเลือกเฉพาะโคโลนีเดี่ยว ๆ (single colony) ที่เจริญบนอาหาร MRS agar ไปเพาะเลี้ยงใน MRS broth ปริมาตร 2 มิลลิลิตร นำแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่คัดเลือกไว้ไปตรวจสอบลักษณะรูปร่างของเซลล์ โดยการย้อมสีแกรม และทดสอบการสร้างเอนไซม์คะตะเลส (catalase)

การเก็บรักษาแลคติกแอซิดแบคทีเรียในรูป glycerol stock culture ทำโดยนำ culture ของแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่เลี้ยงใน MRS broth ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปริมาตร 600 ไมโครลิตร มาเติม glycerol ปริมาตร 400 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปเก็บไว้อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อไว้ใช้ในการทดลองต่อไป

การตรวจสอบความสามารถในการทนกรดของแลคติกแอซิดแบคทีเรีย

การตรวจสอบความสามารถในการทนกรดของแลคติกแอซิดแบคทีเรียทำโดยใช้วิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีของ Jin *et al.* (1998) ซึ่งมีขั้นตอนการทำดังนี้ เลี้ยงแลคติกแอซิดแบคทีเรียในอาหาร MRS broth ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถ่ายเชื้อ 20 ไมโครลิตร ลงในอาหาร MRS broth ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ที่ปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 2 (ชุดทดลอง) ส่วนชุดควบคุมใช้อาหาร MRS broth ที่ไม่มีการปรับ pH (ซึ่งมี pH เท่ากับ 6.8) วิเคราะห์ความเข้มข้นของเชื้อเริ่มต้นที่ 0 ชั่วโมง และหลังจากบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยการวัดค่าความขุ่น (optical density) ของ culture ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 600 นาโนเมตร

เปอร์เซ็นต์การรอดชีวิต (% survival) คำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

(ค่าความขุ่นของชุดทดลอง/ค่าความขุ่นของชุดควบคุม) x 100

การตรวจสอบความสามารถในการทนเกลือน้ำดีของแลคติกแอซิดแบคทีเรีย

การตรวจสอบความสามารถในการทนเกลือน้ำดีของแลคติกแอซิดแบคทีเรียทำโดยใช้วิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีของ Jin *et al.* (1998) ซึ่งมีขั้นตอนการทำดังนี้ เลี้ยงแลคติกแอซิดแบคทีเรียในอาหาร MRS broth ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถ่ายเชื้อ 20 ไมโครลิตร ลงในอาหาร MRS broth ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ที่เติม Ox bile powder (Sigma Aldrich, USA) ให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 2% (w/v) (ชุดทดลอง) วิเคราะห์ความเข้มข้นของเชื้อเริ่มต้นที่ 0 ชั่วโมง และหลังจากบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยการวัดค่าความขุ่น (optical density) ของ culture ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 600 นาโนเมตร ชุดควบคุมของการทดลองนี้ให้ทำทุกอย่างเหมือนกับชุดทดลองเพียงแต่ในชุดควบคุมไม่มีการเติมเกลือน้ำดีใน MRS broth การหาเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิต (% survival) ใช้สูตรที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ไม่สามารถใช้งานได้

การตรวจสอบความสามารถของแลคติกแอซิดแบคทีเรียในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค

การตรวจสอบความสามารถของแลคติกแอซิดแบคทีเรียในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรคทำโดยเลี้ยงแลคติกแอซิดแบคทีเรียในอาหาร MRS broth บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำ culture ที่ได้ตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค โดยวิธี culture spot test ซึ่งมีขั้นตอนการทำดังนี้ นำจุลินทรีย์ทดสอบ *Escherichia coli* O157:H7 ATCC 43895 และ *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 ที่เลี้ยงไว้ในอาหาร nutrient broth (NB) และบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาป้าย (swab) บนจานอาหาร nutrient agar (NA) หยด culture ของแลคติกแอซิดแบคทีเรียปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงบนรอยป้ายของจุลินทรีย์ก่อโรค นำจานเลี้ยงเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกผลโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้ง ซึ่งเกิดเป็นวงใส (clear zone) ขึ้นรอบๆ หยดของแลคติกแอซิดแบคทีเรีย การทดสองนี้ใช้อาหาร MRS broth ที่ปลอดเชื้อเป็น control

การศึกษาจัดจำแนกชนิดของแลคติกแอซิดแบคทีเรียโดยวิธี 16S rDNA sequence analysis

การศึกษาจัดจำแนกชนิดของแลคติกแอซิดแบคทีเรียโดยวิธี 16S rDNA sequence analysis ทำโดยสกัด genomic DNA ของแลคติกแอซิดแบคทีเรียด้วยชุดสกัดสำเร็จรูป Genomic DNA Extraction Kit Mini (RBC Bioscience, Taipei, Taiwan) โดยทำตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต (Real Biotech Corporation, Taiwan) นำ genomic DNA ที่ได้มาใช้เป็นแม่แบบ (template) เพื่อทำ PCR (polymerase chain reaction) โดยใช้ primer 2 ชนิด ได้แก่ FD1 (5’ AGAGTTTGATCCTGGCTCAG 3’) และ RP2 (5’ ACGGCTACCTTGTTACGACTT 3’) สภาวะที่ใช้ในการทำ PCR คือ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที 1 รอบ, 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที, 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที และ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที 30 รอบ และ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที 1 รอบ นำ PCR product ที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์ลำดับเบสด้วยเครื่อง automated DNA sequencer (BioDesign Co., Ltd., Prathumthani. Thailand) แล้วนำลำดับเบสที่ได้ไปเปรียบเทียบกับลำดับเบสของ 16S rDNA ในฐานข้อมูล GENBANK โดยใช้โปรแกรม BLASTN (Basic Local Alignment Search Tools) เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคล้ายคลึง (% homology) ระหว่างลำดับเบสของ 16S rDNA ของแลคติกแอซิดแบคทีเรียกับลำดับเบสของ 16S rDNA ของแลคติกแอซิดแบคทีเรียในฐานข้อมูล GENBANK

ไม่อนุญาตให้ผลงาน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การแยกและคัดเลือกแลคติกแอซิดแบคทีเรียจากอาหารหมัก

หลังจากการแยกแลคติกแอซิดแบคทีเรียจากปลาส้มบนอาหาร MRS agar ซึ่งเป็น selective medium สำหรับแลคติกแอซิดแบคทีเรีย ได้ทำการคัดเลือกโคโลนีของแบคทีเรียที่เจริญบนอาหาร MRS agar ที่เห็นเป็นโคโลนีเดี่ยว ๆ 10 โคโลนี เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป โดยหลักการคัดเลือกได้พยายามคัดเลือกโคโลนีที่มีลักษณะแตกต่างกัน นำโคโลนีของแบคทีเรียที่คัดเลือกไว้ไปเลี้ยงในอาหาร MRS broth แล้วเก็บในรูป glycerol stock แลคติกแอซิดแบคทีเรียที่เก็บไว้ทั้ง 10 ไอโซเลต (isolate) ถูกให้รหัสเป็น K1 – K10

แลคติกแอซิดแบคทีเรียที่สามารถถูกนำไปใช้เป็นโปรไบโอติกได้จำเป็นต้องมีคุณสมบัติหลัก และคุณสมบัติเสริม ดังนี้

คุณสมบัติหลักของการเป็นโปรไบโอติก ได้แก่ ความสามารถในการทนกรด และความสามารถในการทนเกลือน้ำดี สาเหตุที่คุณสมบัติดังกล่าวถูกจัดเป็นคุณสมบัติหลักของโปรไบโอติก เนื่องจากแบคทีเรียทุกชนิดที่จะนำไปใช้เป็นโปรไบโอติกจำเป็นต้องมีคุณสมบัติเหล่านี้ มิเช่นนั้นแบคทีเรียก็จะถูกทำลายโดยกรด และเกลือน้ำดีในระบบทางเดินอาหาร

คุณสมบัติเสริมของการเป็นโปรไบโอติกมีมากมาย ตัวอย่างเช่น ความสามารถในยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ความสามารถในการยึดเกาะที่ผนังลำไส้ ความสามารถในการแข่งขันกับเชื้อก่อโรคในการยึดเกาะกับผนังลำไส้ ความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโต และความสามารถในการส่งเสริมระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย เป็นต้น สาเหตุที่คุณสมบัติดังกล่าวถูกจัดเป็นคุณสมบัติเสริมของโปรไบโอติก เนื่องจากแบคทีเรียที่จะนำไปใช้เป็นโปรไบโอติกอาจมีหรือไม่มีคุณสมบัติเหล่านี้ก็ได้

ในการศึกษานี้ได้นำแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่คัดเลือกไว้ทั้ง 10 ไอโซเลตไปทดสอบความสามารถในการทนกรด และเกลือน้ำดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักของโปรไบโอติก และนำไอโซเลตที่ทนกรดและเกลือน้ำดีได้ดีที่สุดไปทดสอบความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ซึ่งได้แก่ *E. coli* O157:H7 ATCC 43895 และ *S. aureus* ATCC 25923

การตรวจสอบความสามารถในการทนกรดของแลคติกแอซิดแบคทีเรีย

โดยปกติกระเพาะอาหารของคนมีสภาวะเป็นกรด โดยมี pH ประมาณ 2 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์ย่อยโปรตีนที่มีชื่อว่า pepsin ดังนั้นแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่จะใช้เป็นโปรไบโอติกได้จึงจำเป็นที่จะต้องสามารถทนต่อสภาวะที่เป็นกรด ที่ pH 2 ได้ มิเช่นนั้นแล้วแลคติกแอซิดแบคทีเรียก็จะถูกทำลายที่กระเพาะอาหาร และไม่สามารถทำหน้าที่เป็นโปรไบโอติกได้

การทดลองนี้เป็นการทดสอบความสามารถของแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่คัดเลือกไว้ทั้ง 10 ไอโซเลต ในการทนกรดที่ pH 2 ซึ่งพบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 สามารถทนกรดที่ pH 2 ได้ดีที่สุด (มี % survival สูงที่สุด) (Table 1)

การตรวจสอบความสามารถในการทนเกลือน้ำดีของแลคติกแอซิดแบคทีเรีย

การย่อยไขมันที่เกิดขึ้นในลำไส้เล็กของคนจำเป็นต้องอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างเอนไซม์ lipase และเกลือน้ำดี โดยในลำไส้เล็กของคนปกติมักมีเกลือน้ำดีที่ความเข้มข้นประมาณ 0.2% ถึง 2% (Kristoffersen *et al.* 2007) ด้วยเหตุที่เกลือน้ำดีสามารถยับยั้งการเจริญของแลคติกแอซิดแบคทีเรียได้ ดังนั้นแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่จะใช้เป็นโปรไบโอติกได้จึงจำเป็นที่จะต้องสามารถทนต่อเกลือน้ำดีที่ความเข้มข้น 0.2% ถึง 2% ได้ มิเช่นนั้นแล้ว แลคติกแอซิดแบคทีเรียก็จะถูกทำลายที่ลำไส้เล็ก และไม่สามารถทำหน้าที่เป็นโปรไบโอติกได้ ในการทดลองนี้เลือกใช้เกลือน้ำดีที่ความเข้มข้น 0.2% เพื่อเพิ่มโอกาสในการพบแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่สามารถทนเกลือน้ำดีได้ หากในอนาคตต้องการพัฒนาให้แลคติกแอซิดแบคทีเรียทนเกลือน้ำดีได้มากขึ้นก็สามารถทำได้โดยการนำไปเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการเพิ่มความเข้มข้นของเกลือน้ำดีขึ้นเป็นขั้น ๆ เช่น จาก 0.2% เป็น 0.25%, 0.5%, 0.75% และ 1% ตามลำดับ เป็นต้น

การทดลองนี้เป็นการทดสอบความสามารถของแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่คัดเลือกไว้ทั้ง 10 ไอโซเลต (isolate) ในการทนเกลือน้ำดีที่ความเข้มข้น 0.2% ซึ่งพบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียทุกไอโซเลต ยกเว้นรหัส K3, K4 และ K6 สามารถเจริญในอาหาร MRS broth ที่มีเกลือน้ำดี 0.2% และที่ไม่มีเกลือน้ำดีได้ใกล้เคียงกันมาก

ห้ามนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

สังเกตได้จาก % survival ที่มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับ 100% มาก (Table 2) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการเจริญของแลคติกแอซิดแบคทีเรียเหล่านี้ไม่ถูกกระทบโดยเกลือน้ำดีที่ความเข้มข้น 0.2%

Table 1 Acid tolerance of the isolated lactic acid bacteria.

Lactic acid bacteria	OD (optical density) (pH 2)	OD (optical density) (control)	% survival
K1	0.16	1.43	11.19
K2	0.20	1.56	12.82
K3	0.18	1.54	11.69
K4	0.18	1.51	11.92
K5	0.01	1.11	0.90
K6	0.21	1.54	13.64
K7	0.06	1.23	4.88
K8	0.77	1.70	45.29
K9	0.54	1.71	31.58
K10	0.21	1.51	13.91

Table 2 Bile salt tolerance of the isolated lactic acid bacteria.

Lactic acid bacteria	OD (0.2% bile salt)	OD (control)	% survival
K1	1.42	1.43	99.30
K2	1.59	1.56	101.92
K3	1.45	1.54	94.16
K4	1.42	1.51	94.04
K5	1.13	1.11	101.80
K6	1.44	1.54	93.51
K7	1.24	1.23	100.81
K8	1.70	1.70	100.00
K9	1.70	1.71	99.42
K10	1.54	1.51	101.99

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองข้างต้นพบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่สามารถทนทั้งกรดและเกลือน้ำดี (ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักของโปรไบโอติก) ได้ดีที่สุด คือ แลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 เนื่องจากสามารถทนกรดที่ pH 2 ได้ดีที่สุด และเกลือน้ำดีที่ความเข้มข้น 0.2% ไม่มีผลกระทบต่อการเจริญของแบคทีเรียดังกล่าว ด้วยเหตุนี้

ห้ามมิให้เผยแพร่ภายนอก

แลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 จึงถูกคัดเลือกเพื่อนำไปตรวจสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรค (ซึ่งเป็นหนึ่งในคุณสมบัติเสริมของโปรไบโอติก) และนำไปจัดจำแนกชนิดโดยวิธี 16S rDNA sequence analysis

การตรวจสอบความสามารถของแลคติกแอซิดแบคทีเรียในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค

เมื่อนำแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 มาทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของ *E. coli* O157:H7 ATCC 43895 (ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ) และ *S. aureus* ATCC 25923 (ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก) พบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียดังกล่าวไม่สามารถยับยั้งเชื้อก่อโรคทั้งสองชนิดได้

ถึงแม้ว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 ไม่สามารถยับยั้งการเจริญของ *E. coli* O157:H7 ATCC 43895 และ *S. aureus* ATCC 25923 ได้ก็ไม่ได้หมายความว่าจะไม่สามารถนำไปใช้เป็นโปรไบโอติกได้ หากทำการศึกษาต่อไปแล้วพบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียดังกล่าวมีคุณสมบัติเสริมของโปรไบโอติก ข้อใดข้อหนึ่ง เช่น มีความสามารถในการส่งเสริมระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย แลคติกแอซิดแบคทีเรียดังกล่าวก็สามารถถูกนำไปใช้เป็นโปรไบโอติกได้ โดยนำไปใช้เพื่อช่วยให้ร่างกายมีภูมิคุ้มกันที่ดีขึ้น เป็นต้น

การจัดจำแนกชนิดของแลคติกแอซิดแบคทีเรียโดยวิธี 16S rDNA sequence analysis

จากการย้อมแกรม และศึกษารูปร่างของแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียดังกล่าวติดสีแกรมบวก และมีรูปร่างกลม

เมื่อนำ genomic DNA ของแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 มาใช้เป็น template ในการทำ PCR เพื่อเพิ่มจำนวน 16S rDNA พบว่า PCR product ที่ได้มีขนาดประมาณ 1,500 bp (Figure 1) เมื่อนำ PCR product ไปตรวจหาลำดับเบส พบว่ามีลำดับเบสจำนวน 1,498 bp (Figure 2) และเมื่อนำลำดับเบสดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับลำดับเบสของ 16S rDNA ที่อยู่ในฐานข้อมูล GENBANK พบว่าลำดับเบสของ PCR product ที่ได้มีความคล้ายคลึงกับลำดับเบสของ 16S rDNA ของ *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strain IL 1403 ด้วยเปอร์เซ็นต์ความคล้ายคลึง (% homology) เท่ากับ 99% ผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 มีความเป็นไปได้ที่จะเป็น *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามี *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* หลายสายพันธุ์ที่มีคุณสมบัติโปรไบโอติก ตัวอย่างเช่น *Lactococcus lactis* subsp. *Lactis* DF04Mi (Furtado *et al*., 2014) *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* I2 (Heo *et al*., 2013) *Lactococcus lactis* subsp. *Lactis* CV56 (Gao *et al*., 2010) และ *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* HV219 (Todorov *et al*., 2007)

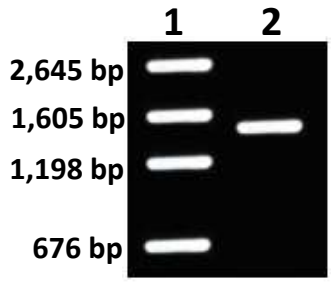


Figure 1 PCR product obtained from the PCR amplification of 16S rDNA of lactic acid bacteria K8. Lane 1 and 2 = pGEM DNA marker and PCR product, respectively.

```
gacgaacgct ggcggcgtgc ctaatacatg caagttgagc gctgaaggtt ggtacttgta
ccgactggat gagcagcgaa cgggtgagta acgcgtgggg aatctgcctt tgagcggggg
acaacatttg gaaacgaatg ctaataccgc ataaaaactt taaacacaag ttttaagttt
gaaagatgca attgcatcac tcaaagatga tcccgcgttg tattagctag ttggtgaggt
aaaggctcac caagacgatg atacatagcc gacctgagag ggtgatcggc cacattggga
ctgagacacg gcccaaactc ctacgggagg cagcagtagg gaatcttcgg caatggacga
aagtctgacc gagcaacgcc gcgtgagtga agaaggtttt cggatcgtaa aactctgttg
gtagagaaga acgttggtga gagtggaaag ctcatcaagt gacggtaact acccagaaag
ggacggctaa ctacgtgcca gcagccgcgg taatacgtag gtcccgagcg ttgtccggat
ttattgggcg taaagcgagc gcaggtggtt tattaagtct ggtgtaaaag gcagtggctc
aaccattgta tgcattggaa actggtagac ttgagtgcag gagaggagag tggaattcca
agtgtagcgg tgaaatgcgt agatatatgg aggaacaccg gtggcgaaag cggctctctg
gcctgtaact gacactgagg ctcgaaagcg tggggagcaa acaggattag ataccctggt
agtccacgcc gtaaacgatg agtgctagat gtagggagct ataagttctc tgtatcgcag
ctaacgcaat aagcactccg cctggggagt acgaccgcaa ggttgaaact caaaggaatt
gacgggggcc cgcacaagcg gtggagcatg tggtttaatt cgaagcaacg cgaagaacct
taccaggtct tgacatactc gtgctattcc tagagatagg aagttccttc gggacacggg
atacaggtgg tgcatggttg tcgtcagctc gtgtcgtgag atgttgggtt aagtcccgca
acgagcgcaa cccctattgt tagttgccat cattaagttg ggcactctaa cgagactgcc
ggtgataaac cggaggaagg tggggatgac gtcaaatcat catgcccctt atgacctggg
ctacacacgt gctacaatgg atggtacaac gagtcgcgag acagtgatgt ttagctaatc
tcttaaaacc attctcagtt cggattgtag gctgcaactc gcctacatga agtcggaatc
gctagtaatc gcggatcagc acgccgcggt gaacacgttc ccgggccttg tacacaccgc
ccgtcacacc acgggagttg ggagtacccg aagtaggttg cctaaccgca aggagggcgc
ttcctaaggt aagaccgatg actggggtga agtcgtaaca aggtagccgt atcggaag
```

Figure 2 Sequence of 16S rDNA of lactic acid bacteria K8.

สรุป

จากการแยกและคัดเลือกแลคติกแอซิดแบคทีเรียจากปลาส้มมา 10 ไอโซเลต เพื่อทดสอบความสามารถในการทนกรด และเกลือน้ำดี (ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักของโปรไบโอติก) พบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 สามารถทนกรดที่ pH 2 ได้ดีที่สุด และการเจริญในอาหาร MRS broth ก็ไม่ถูกกระทบโดยเกลือน้ำดีที่ความเข้มข้น 0.2% เมื่อนำแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 มาทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรค พบว่าไม่สามารถยับยั้งได้ทั้ง *E. coli* O157:H7 ATCC 43895 และ *S. aureus* ATCC 25923 จากการจัดจำแนกชนิดของแลคติกแอซิดแบคทีเรียด้วยวิธี 16S rDNA sequence analysis พบว่าแลคติกแอซิดแบคทีเรียรหัส K8 น่าจะเป็น *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*

เอกสารอ้างอิง

Furtado, D. N., S. D. Todorov, M. Landgraf, M. T. Destro and B. D. G. M. Franco. 2014. Bacteriocinogenic *Lactococcus lactis* subsp. *Lactis* DF04Mi isolated from goat milk: Evaluation of the probiotic potential. **Brazilian Journal of Microbiology** 45: 1047-1054.

Gao, Y., Y. Lu, K. L. Teng, M. L. Chen, H. J. Zheng, Y. Q. Zhu and J. Zhong. 2010. Complete Genome Sequence of *Lactococcus lactis* subsp. *Lactis* CV56, a Probiotic Strain Isolated from the Vaginas of Healthy Women. **Journal of Bacteriology** 193: 2886-2887.

ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ภายนอก

Heo, W. S., Y. R. Kim, E. Y. Kim, S. C. Bai and I. S. Kong. 2013. Effects of dietary probiotic, *Lactococcus lactis* subsp. *Lactis* I2, supplementation on the growth and immune response of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). **Aquaculture 376-379**: 20-24.

Jin, L. Z., Y. W. Ho, N. Abdullah and S. Jalaludin. 1998. Acid and bile tolerance of *lactobacillus* isolated from chicken intestine. **Letters in Applied Microbiology** 27: 183-185.

Kristoffersen, S. M., S. Ravnum, N. J. Tourasse, O. A. Okstad, A. B. Kolsto and W. Davies. 2007. Low concentrations of bile salts induce stress responses and reduce motility in *Bacillus cereus* ATCC 14570. **Journal of Bacteriology** 189: 5302-5313.

Ljungh, A. and T. Wadstrom. 2006. Lactic acid bacteria as probiotics. **Current Issues in Intestinal Microbiology** 7: 73-89.

Medina, M., E. Vintini, J. Villena, R. Raya and S. Alvarez. 2010. *Lactococcus lactis* as an adjuvant and delivery vehicle of antigens against pneumococcal respiratory infections. **Bioengineered Bugs** 1: 313–325.

Mugambi, M. N., T. Young and R. Blaauw. 2014. Application of evidence on probiotics, prebiotics and synbiotics by food industry: a descriptive study. **BMC Research Notes** 7:754.

Ouwehand, A. C., S. Salminen and E. Isolauri. 2002. Probiotics: an overview of beneficial effects. **Antonie Van Leeuwenhoek** 82: 279-289.

Rattanachaikunsopon, P. and P. Phumkhachorn. 2010. Effect of *Cratoxylum formosum* on innate immune response and disease resistance against *Streptococcus agalactiae* in tilapia *Oreochromis niloticus*. **Fisheries Science** 76: 653-659.

Todorov, S. D., M. Botes, S. T. Danova and L. M. Dicks. 2007. Probiotic properties of *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* HV219, isolated from human vaginal secretions. **Journal of Applied Microbiology** 103: 629-639.

ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำเพื่อการค้า

การผลิตถ่านกัมมันต์จากชีวมวลเปลือกมังคุดเพื่อกำจัดโลหะหนัก

Production of Activated Carbon from Mangosteen Shell Biomass for heavy metal removal.

สัมพันธ์ สร้อยกล่อม[1*] อัจฉรา แสนฟ้างำ[2] จุฑามาศ ทิพย์เนตร[2] และโสภา กลิ่นจันทร์[2]

Sumpan Soiklom[1*] Achara Sanphangum[2] Jutamas Thipnet[2] and Sopa Klinchan[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้เปลือกมังคุดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งผลิตถ่านกัมมันต์และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ เวลา และอุณหภูมิในการทำให้เป็นถ่าน (carbonization) รวมถึงความเข้มข้นกรดฟอสฟอริก ระยะเวลาในการแช่กรด เวลาและอุณหภูมิการกระตุ้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ (activation) จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการทำให้เป็นถ่านคือเผาเปลือกมังคุดที่ 500 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที และสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือใช้กรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 (v/v) เวลาแช่กรด 180 นาที โดยมีระยะเวลาและอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 700 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดที่ได้มีคุณภาพทางกายภาพและเคมีและความสามารถดูดซับโลหะตะกั่วและโครเมียมเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

ABSTRACT

This research aims to use mangosteen shell to produce activated carbon and to study efficiency of it for heavy metal removal. The operating parameters were studied optimum carbonization and activation time and optimum temperature as well as phosphoric acid concentration. The results showed that the optimum condition of carbonization of mangosteen shell was 120 min at 500 ^{o}C. The optimum phosphoric concentration for activation was 5% (v/v) and optimum acid soaking time was 180 min while activation time and temperature was 60 min at 700^{o}C. The physical and chemical properties of mangosteen shell activated carbon were similar to the commercial activated carbon. Furthermore, the mangosteen shell activated carbon could remove lead and chromium like the commercial activated carbon.

Keyword : activated carbon, mangosteen shell, heavy metal removal, lead, chromium

* Corresponding author; e-mail address: **sumpans@kmutnb.ac.th**

[1] ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[1] Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[2] ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] Department of Biotechnology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม นอกจากนี้ยังมีอุตสาหกรรมทางการเกษตรเพื่อนำผลผลิตออกสู่ตลาดทั้งในและนอกประเทศ ทำให้มีกากและเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและจากการผลิต มังคุดเป็นผลไม้ที่มีการปลูกมากและเมื่อบริโภคแล้วจะเหลือเปลือกทิ้งโดยไม่ก่อให้เกิดประโยชน์จำนวนมาก โดยในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีผลผลิตมังคุด 199,861 ตัน (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร ,2558) ดังนั้นย่อมจะมีเปลือกมังคุดที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากเช่นกัน

ถ่านกัมมันต์ (Activate carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นโดยผ่านกระบวนการคาร์บอไนซ์เซชั่นและทำการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีหรือทางกายภาพ ทำให้ผิวของคาร์บอนของถ่านกัมมันต์เกิด ร่างแหรูพรุน จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ซึ่งช่วยให้มีสมบัติในการดูดซับสูง วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิดเช่นไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้งและวัสดุ เหลือทิ้งทางการเกษตร เช่นแกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย เปลือกมะพร้าว (Grauito *et al.* 2008) เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นใช้ในการฟอกสีในอุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้กำจัดกลิ่นในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เช่น เบียร์และไวน์ ใช้ในการดูดซับสีและกลิ่น ใช้ในการดูดแก๊สและไอ ใช้ในการทำน้ำประปา ใช้ในเครื่องกรองน้ำ ใช้ดูดซับโลหะหนัก เป็นต้น จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์นั้นมีประโยชน์การใช้งานมากมาย ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการผลิต ตรวจสอบคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากเปลือกมังคุด เพื่อศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนัก เป็นการลดปริมาณขยะ ที่จะต้องนำไปกำจัดซึ่งจะช่วยลดปัญหาและผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุชีวมวลเหลือใช้อีกทางหนึ่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

ตัวอย่าง : เปลือกมังคุด

1. **ศึกษาการผลิตถ่านมังคุด**

นำเปลือกมังคุด ล้างแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาด้วยเตาเผาชนิดอับอากาศที่อุณหภูมิ 400 ^{O}C 500 ^{O}C และ 600 ^{O}C ตามลำดับ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง บดถ่านให้มีขนาดเล็กกว่า 50 mesh สังเกตลักษณะถ่านและวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน (Walkley and Black method)

2. **ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์**

ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ได้แก่

2.1 **ศึกษาความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ใช้กระตุ้นถ่านกัมมันต์และศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผากระตุ้น** - นำถ่านที่ได้จากข้อ 1 ไปกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ที่ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% , 20%, 30% และ 60% (v/v) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ล้างมีสภาพเป็นกลาง นำไปอบที่ 110 ^{0}C เวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็น แล้วเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 ^{0}C และ 700 ^{O}C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พิจารณาสภาวะความเข้มข้นกรดฟอสฟอริกและอุณหภูมิการเผากระตุ้นที่ที่เหมาะสม จากค่าการดูดซับไอโอดีน (ASTM D 4607) และค่าการดูดซับเมทีลีนบลู (colorimetric method, UV-Vis spectrophotometer)

2.2 ศึกษาระยะเวลาในการแช่กรดฟอสฟอริกและระยะเวลาในการเผากระตุ้นที่เหมาะสม

- นำตัวอย่างถ่านมังคุดเผากระตุ้นโดยใช้ความเข้มข้นกรดและอุณหภูมิในการเผากระตุ้นตามสภาวะที่เลือกได้จากข้อ 2.1 แช่กรดฟอสฟอริกที่เวลา 1 ชม. และ 3 ชม. และเผากระตุ้นเป็น 1 ชม. และ 3 ชม. แล้วนำถ่านกัมมันต์ที่ได้วิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทีลีนบลู

3. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก

นำถ่านกัมมันต์ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่วและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเทคนิค AAS โดยใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.5 กรัม 1.0 กรัม และ 1 กรัม ในการดูดซับโลหะหนักตะกั่วและแคดเมียมความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม

4. ศึกษาคุณสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

นำถ่านกัมมันต์ที่ได้และถ่านกัมมันต์เกรดการค้าทดสอบคุณสมบัติดังนี้ 1) การดูดซับไอโอดีน 2) ค่าการดูดซับเมทีลีนบลู 3) ค่าความเป็นกรด ด่าง 4) ค่าความชื้น 5) ค่าความหนาแน่น 6) ปริมาณเถ้า

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลศึกษาการผลิตถ่านมังคุด

พบว่าถ่านที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 °C ยังมีเปลือกมังคุดบางส่วนที่ยังไม่แปรสภาพเป็นถ่านและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 500 °C พบว่าถ่านมีสีดำมันวาว เปลี่ยนรูปเป็นถ่านมากขึ้น เมื่อนำถ่านที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนพบว่าถ่านซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศที่อับอากาศให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนมากที่สุดคือ 69.40 % (ตารางที่ 1) จึงเลือกการเผาที่ 500 °C ระยะเวลา 120 นาที สำหรับการทดลองต่อไป

Table 1 The percentage organic carbon at various temperature.

Temperature (°c)	Organic carbon (%)
400	56.89± 0.09
500	69.40 ± 0.12
600	48.93 ± 0.28

2. ผลศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์

2.1 ผลศึกษาความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ใช้กระตุ้นถ่านกัมมันต์และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผากระตุ้น

พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ 60% อุณหภูมิการเผากระตุ้นที่ 700 °C มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอโอดีน 1045.7 mg/g และค่าการดูดซับเมธิลลีนบลู 44.4 mg/g ซึ่งเป็นคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ดีที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับที่การแช่กรดฟอสฟอริกที่ 5% อุณหภูมิการเผากระตุ้นที่ 700 °C ซึ่งมีค่าดูดซับไอโอดีนและเมธิลลีนบลู 975.3 mg/g และ 45.8 mg/g ตามลำดับ (ตารางที่ 2) ซึ่งมีค่าต่างกับสภาวะที่ดีที่สุด

ไม่มากเกินไป จึงได้เลือกนำถ่านกัมมันต์ที่แช่กรดฟอสฟอริกที่ 5% อุณหภูมิการเผากระตุ้นที่ 700 °C ไปใช้ในการทดลองต่อไปเนื่องจากเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมี

Table 2 The iodine number and methylene blue number of Mangosteen activated carbon at various phosphoric acid and various temperature.

Temp (°C) / Phosphoric acid(% v/v)	Iodine number (mg/g)					Methylene blue (mg/g)				
	5	10	15	30	60	5	10	15	30	60
600	1005.7	998.8	1005.5	982.0	1008.8	33.2	37.3	35.3	35.7	35.7
700	975.3	951.8	851.3	871.4	1045.7	45.8	42.4	15.6	33.9	44.4

2.2 ผลการศึกษาระยะเวลาในการแช่กรดและเผากระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม

เวลาในการแช่กรดฟอสฟอริกและเวลาในการเผากระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม คือ แช่กรด 3 ชั่วโมง และการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าการดูดซับเมธิลลีนบลูมากที่สุดซึ่งมีค่า 70.2 mg/g (ตาราง 3) จึงเลือกการผลิตถ่านกัมมันต์ที่สภาวะดังกล่าว ทั้งนี้การเผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานอีกทางหนึ่ง

Table 3 The Methylene blue number of Mangosteen activated carbon at various soaking times in phosphoric acid and various activated times

Soaking time in phosphoricacid (hour)	Activated Time (hour)	Methylene blue number (mg/g)
1	1	69.7
1	3	70.1
3	1	70.2
3	3	70.1

3. ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักตะกั่วและโครเมียม

พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้คือถ่านกัมมันต์มังคุด (Mango ACT) มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นโดยเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.5 กรัม ที่เวลาการดูดซับ 20 นาที ให้ค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วดีที่สุด คือ 4.1% ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (Com ACT) ในสภาวะเดียวกันที่มีประสิทธิภาพการดูดซับ 3.5% แต่ทั้งนี้ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าที่ปริมาณ 1.5 กรัม ที่เวลาดูดซับ 20 นาที มีความสามารถดูดซับตะกั่วดีที่สุด คือ 9.9% (รูป 1)

เมื่อนำถ่านกัมมันต์มังคุด (Mango ACT) ดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์โลหะโครเมียมพบว่าเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 1.5 g และใช้เวลาดูดซับ 20 นาทีสามารถดูดซับโครเมียมได้ดีที่สุดถึง 30.6% ในขณะที่ถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีค่าการดูดซับโครเมียม 34.8% (รูป 2)

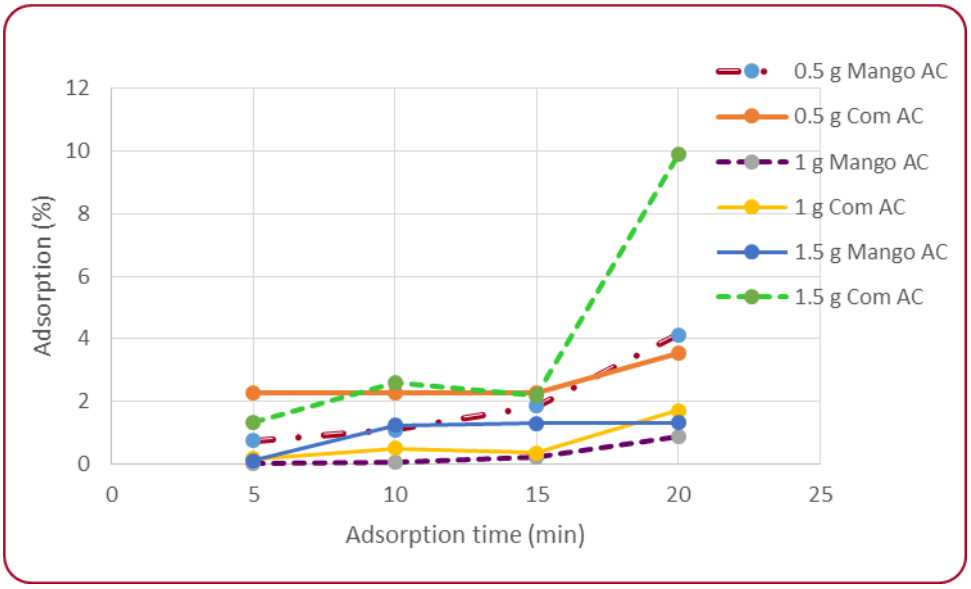


Figure 1 The adsorption of Pb content at the various Mangosteen- activated carbons (Mango ACT) and Commercial activated carbons (Com ACT) quantities at various absorption times.

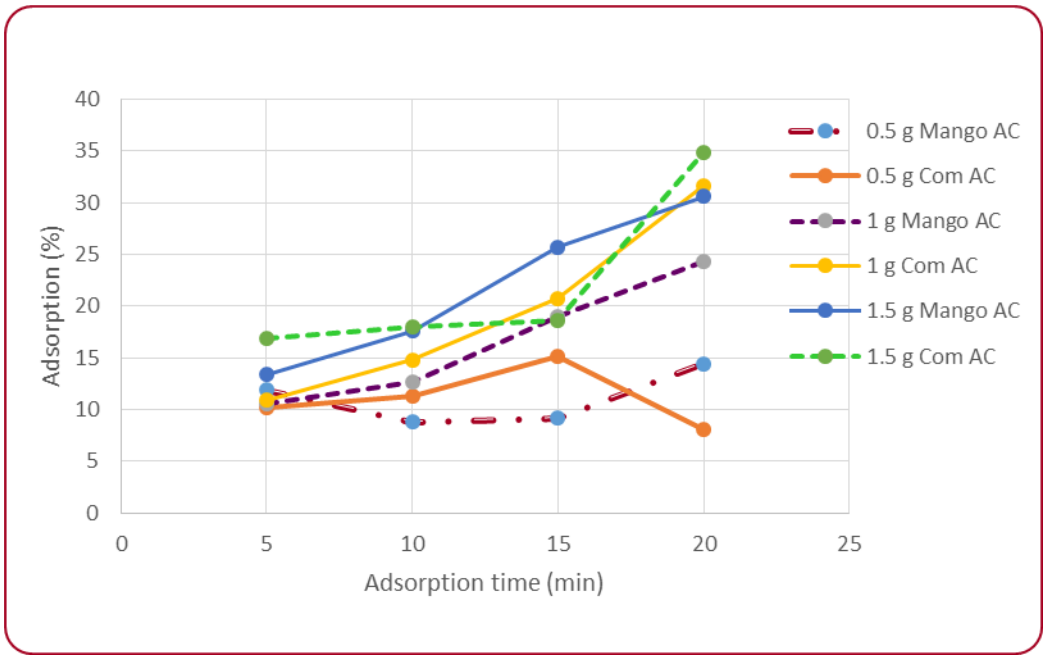


Figure 2 The adsorption of Cr content at the various Mangosteen- activated carbons and commercial activated carbons quantities at various absorption times.

4. ผลการศึกษาคุณสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ทดสอบคุณสมบัติทางกายภายพบว่ามีค่าเมธิลลีนบลู 63.6 mg/g ค่าไอโอดีน 958.1 mg/g ในขณะที่ถ่านกัมมันต์เกรดการค้าเท่ากับ 1,394.6 mg/g ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 8.25 ความหนาแน่น 0.37 g/cm^3 และค่าเถ้า 93.5% (ตาราง 4) ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าภายใต้สภาวะเดียวกันในการผลิตถ่านกัมมันต์เดียวกันอาจจะให้ค่าแตกต่างกันเช่น ค่าเมธิลลีนบลูแตกต่างกันเนื่องจากการสุ่มตัวอย่างซึ่งจะต้องให้ความสำคัญตรงจุดนี้เป็นอย่างมาก สำหรับค่าไอโอดีนที่ได้สอดคล้องกับของ Chen Y. *et al*. 2011 ที่ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดโดยการ กระตุ้นด้วยโปแตสเซียมคาร์บอร์เนต โดยสภาวะที่เหมาะสมคือการเผากระตุ้นที่ 900 °C เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งจะให้ไอโอดีน 954 mg/g

Table 4 Physical properties of Mangosteen Shell Activated Carbon and Commercial Activated Carbon.

Item	Methylene blue (mg/g)	Iodine number (mg/g)	Density (g/cm^3)	Moisture (%)	pH	Ash (%)
Mangosteen- Activated Carbon	63.6	958.1	0.37	2.9	8.25	93.5
Commercial Activated Carbon	65.7	1,394.6	0.52	7.5	8.81	96.1

สรุปและวิจารณ์ผล

เปลือกมังคุดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้โดยมีสภาวะในการผลิตคือ เผาเปลือกที่ 500 °C เป็นเวลา 120 นาที และสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือใช้กรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 (v/v) เวลาแช่กรด 180 นาที โดยมีเวลาและอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 700 °C เป็นเวลา 60 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณภาพเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ยังมีความสามารถในการดูดซับน้ำเสียตะกั่วและโครเมียมสังเคราะห์ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Chen *et al*. 2012. ที่ใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกมังคุดดูดซับโลหะหนักได้ โดยดูดซับ Cu (II)

เอกสารอ้างอิง

ศูนย์สารสนเทศการเกษตร ,2558, มังคุด : **เนื้อที่ยืนต้น เนื้อที่ให้ผลผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ปี 2556 -2558**,สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

Chen Y., Huang B., Huang M. , Cai B. 2011. On the preparation and characterization of activated carbon from mangosteen shell. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 42: 837–842.

Chen Y., Huang M. , Chen W. Huang B., 2011. Absorption of Cu(II) from aqueous solution using activated carbon derived from mangosteen sheel. **Bioresources**, 7(4):4965-4975.

Gratuito M.K.B., Panyathanmaporn T.,Chumnanklang R.A. ,Sirinuntawittaya N., Dutta A. .2008.Production of activated carbon from coconut shell: Optimization using response surface methodology. **Bioresource Technology**, 99 : 4887–4895.

การเตรียมโวลลาสโทไนต์กลาสเซรามิกจากเปลือกไข่ เพอร์ไลต์และเศษแก้ว

Fabrication of Wollastonite Glass-Ceramics from Eggshell Perlite and Waste Glass

ปฏิภาณ หนักคำ[1] พรพิมล เขียวภูมี[1] และ นภัสถ์ จันทร์มี[1*]

Patiphan Nakkam[1] , Pornpimol Kaewpoomee[1] and Napat Chantaramee[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบผลของการใช้สารก่อผลึกที่สังเคราะห์จากวัสดุเหลือทิ้งและวัตถุดิบธรรมชาติ ตลอดจนผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดผลึกในกลาสเซรามิก โดยสังเคราะห์สารก่อผลึกจากเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัวเพื่อนำไปผสมกับเศษแก้วโซดาไลม์ ซินเทอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-1050 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันพบว่า กลาสเซรามิกที่เตรียมได้นั้นประกอบด้วยผลึกของโวลลาสโทไนต์ คริสโทแบไลต์และควอตซ์ปะปนในเฟสแก้ว ทั้งนี้สามารถเตรียมโวลลาสโทไนต์กลาสเซรามิกได้โดยใช้สารก่อผลึกร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส

ABSTRACT

The purpose of this research was to examine the effect of nucleating agent which was synthesized from waste and natural materials, and sintering temperature on the crystalline phase formation in glass-ceramic. Nucleating agent was synthesized from calcined eggshell and expanded perlite prior to blend with soda-lime waste glass, and then sintered from 850 to 1050 ^{o}C at a heating rate of 10 ^{o}C/min for 30 minutes. The XRD results showed that crystalline phases embedded in the glassy phase were wollastonite, cristobalite and quartz. However, the wollastonite glass-ceramic can be fabricated by using 20wt% of the synthesized nucleating agent and sintered at 950 ^{o}C.

Key words : wollastonite, perlite, eggshell, glass-ceramic

*Corresponding author; e-mail address : **napat@mju.ac.th**

[1]สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

[1]Program in Materials Science, Faculty of science, Maejo University, Chiangmai 50290

คำนำ

ปัจจุบันการจัดการวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธี 3R (Reduce, Reuse, and Recycle) เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการบริหารขยะและสร้างทางเลือกในการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ทดแทนวัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติ หรือวัตถุดิบสังเคราะห์ที่มีราคาแพงนั้น เป็นประเด็นที่เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาวิจัยในด้านต่างๆ มากขึ้น และรวมถึงการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกลาสเซรามิก จากการรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวกับการผลิตกลาสเซรามิกนั้น พบว่า กลาสเซรามิกสามารถเตรียมได้จากการใช้เศษแก้วร่วมกับวัตถุดิบเหลือใช้จากอุตสาหกรรม เช่น การเตรียมกลาสเซรามิกโดยใช้ผงเศษแก้วร้อยละ 65 ผสมกับเถ้าลอยร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก (Yoon et al., 2013) ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 850-1050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าโวลลาสโทไนต์กลาสเซรามิก ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1000 และ 1050 องศาเซลเซียส มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับโวลลาสโทไนต์กลาสเซรามิกซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 850-950 องศาเซลเซียส เนื่องจาก พบเฟสของโวลลาสโทไนต์มีลักษณะคล้ายแท่งเข็มขนาดเล็กชัดเจน แต่สำหรับความทนทานต่อสารเคมีซึ่งวัดโดยการตรวจสอบน้ำหนักที่สูญเสียของตัวอย่าง ไม่เปลี่ยนไปตามกระบวนการทางความร้อน นอกจากนี้ Cheng et al. (2002) และ Cheng and Chen (2004) เตรียมกลาสเซรามิกโดยใช้เถ้าลอยเช่นกัน ซินเทอร์ระหว่างอุณหภูมิ 850-1050 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบเฉพาะผลึกของเจเลไนต์ (Gehlenite;$Ca_2Al_2SiO_7$) เท่านั้น โดยการซินเทอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 900-950 องศาเซลเซียส เจเลไนต์กลาสเซรามิกมีค่าความทนแรงอัดและความทนแรงดัดสูงกว่าเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 850 หรือ 1000 องศาเซลเซียสขึ้นไป ทั้งนี้กลาสเซรามิกยังสามารถเตรียมได้โดยใช้เถ้าหนัก (Aloisi et al., 2006) เผาเถ้าหนักที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส ซึ่งเตรียมให้อยู่ในรูปของแก้ว และผสมกับผงอะลูมินาร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก โดยใช้เถ้าหนักที่ไม่ผสมผงอะลูมินาเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ เมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์เชิงความร้อน (DTA) จะพบอุณหภูมิการตกผลึกระหว่าง 860-925 องศาเซลเซียส และการเพิ่มปริมาณอะลูมินาไม่ส่งผลกับอุณหภูมิการตกผลึก นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบอัตราการหดตัวของตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มปริมาณอะลูมินาส่งผลให้การหดตัว ความพรุน และอัตราการเผาของกลาสเซรามิกลดลง จากการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบผลึกของไพรอกซีน (Pyroxene;$(Mg, Fe)_2.(SiO_4)$) อะนอร์ไทต์ (Anorthite;$CaAl_2Si_2O_8$) เจเลไนต์ (Gehlenite;$Ca_2Al_2SiO_7$) ในเฟสแก้ว ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณผงอะลูมินาจะยับยั้งกระบวนการตกผลึกของไพรอกซีน อะนอร์ไทต์ และเจเลไนต์ ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับสมบัติเชิงกลของกลาสเซรามิกที่ไม่เติมผงอะลูมินา

นอกจากนี้พบสิทธิบัตร U.S.Patent No. US2014/0191448 A1, 2014 (Binhussain et al., 2014) ซึ่งได้กล่าวถึง วิธีการเตรียมกลาสเซรามิกจากเศษแก้วร้อยละ 65-95 และสารเพิ่มความขาวร้อยละ 5-35 โดยสารเพิ่มความขาวคือ ดินขาวเผา (Meta-kaolin) หรือ โวลลาสโทไนต์พรีเคอร์เซอร์ (Wollastonite precursor) หรือ แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) หรือ ของผสมระหว่างอัลฟาควอตซ์ (α-SiO_2) และหินปูน ($CaCO_3$) ที่ปริมาณสารสัมพันธ์ 1 : 1 และสารให้สีซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มเมทัลซิลิเกต การเตรียมกลาสเซรามิกใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 750-1100 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5-50 องศาเซลเซียส/นาที นาน 15-60 นาที ประกอบกับมีรายงานการวิจัยที่ศึกษาการเตรียมโวลลาสโทไนต์พรีเคอร์เซอร์ ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของแคลเซียมออกไซด์ ได้แก่ หินปูน เปลือกไข่ แคลเซียมไนเตรต ชอล์ก เปลือกหอย และวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของ

ซิลิกา ซึ่งได้แก่ ควอตซ์ ซิลิกาเจล ซิลิกาฟูม เพอร์ไลต์ขยายตัว แกลบข้าว (Nour et al., 2008; Javed et al., 2009; Vichaphund et al., 2011; Zhang and Liu, 2013) โดยกรณีการเตรียมโวลลาสโทไนต์พรีเคอร์เซอร์จากการใช้วัตถุดิบตั้งต้นเป็นเปลือกไข่และเพอร์ไลต์ขยายตัวนั้น (พรพิมล และคณะ , 2557) ได้ข้อสรุปจากการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันร่วมกับการตรวจสอบลักษณะสัณฐานของผงที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบเฟสปฐมภูมิของโวลลาสโทไนต์มีลักษณะคล้ายแท่งเข็มขนาดเล็ก เกิดขึ้นร่วมกับเฟสเจเลไนต์ โดยความเป็นผลึกของโวลลาสโทไนต์ชัดเจนขึ้นเมื่อเตรียมจากอัตราส่วนผสมระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเป็น 1 : 1.2 ซินเทอร์ที่ 1100 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง

การศึกษานี้ทดลองเตรียมกลาสเซรามิกจาก เศษแก้ว เปลือกไข่ และเพอร์ไลต์ โดย สังเคราะห์ สารก่อผลึก (Nucleating agent) จากเปลือกไข่เผา (Calcined eggshell) และเพอร์ไลต์ขยายตัว (Expanded perlite) เพื่อนำไปผสมกับเศษแก้วโซดาไลม์ ซินเทอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 850-1050 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที นาน 30 นาที ตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน และตรวจสอบลักษณะสัณฐาน ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พร้อมทั้งวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ เพื่อตรวจสอบผลของการใช้สารก่อผลึกที่สังเคราะห์จากวัสดุเหลือทิ้งและวัตถุดิบธรรมชาติดังกล่าว ตลอดจนผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดผลึกในกลาสเซรามิก

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

การทดลองเริ่มต้นด้วยการสังเคราะห์สารก่อผลึกจากเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัวเพื่อนำไปผสมกับเศษแก้วโซดาไลม์ที่บดให้มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 325 เมช องค์ประกอบทางเคมี ของวัตถุดิบตั้งต้น แสดงใน Table 1 การสังเคราะห์ใช้ลำดับขั้นตอนตามที่ระบุในงานก่อนหน้า (พรพิมลและคณะ, 2557) แต่กำหนดเงื่อนไขใช้อัตราส่วน CaO : SiO_2 เป็น 1 : 1.4 เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าวสามารถสังเคราะห์สารก่อผลึกเฟสโวลลาสโทไนต์

การเตรียมกลาสเซรามิกในการศึกษานี้ ใช้สารก่อผลึกไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และใช้ผงเศษแก้วที่ไม่ผสมสารก่อผลึกเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ อัดขึ้นรูปตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร หนา 0.6 เซนติเมตร ด้วยแรงอัดในทิศทางเดียว 15 เมกะปาสกาล โดยไม่ใช้สารเชื่อมประสาน ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 850, 950 และ 1050 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที นาน 30 นาที โดยใช้เตาไฟฟ้า (Interkilns industry Co.,Ltd)

Table 1 Chemical composition of the raw materials

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	SO_3	LOI
Calcined eggshell	0.10	-	-	-	94.09	1.10	-	0.20	0.40	0.20	3.91
Expended perlite	72.63	14.10	1.59	0.31	1.08	0.41	3.30	5.37	-	-	1.21
Soda-lime silicate glass	72.39	1.54	0.16	0.08	10.62	1.75	0.21	13.09	-	0.15	-

การตรวจสอบลักษณะเฉพาะ

วิเคราะห์เฟสในกลาสเซรามิก ด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD, X'Pert Philips) และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, LEO 1450VP) พร้อมวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบจากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDX) เพื่อศึกษาผลของการเติมสารก่อผลึกและอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดผลึก

ผลการทดลองและวิจารณ์

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเศษแก้วโซดาไลม์ที่ผ่านการซินเทอร์ ณ อุณหภูมิ 850 และ 950 องศาเซลเซียส (Figure 1) พบผลึกโวลลาสโทไนต์ (JCPDS : 27-0088) คริสโตแบไลต์ (JCPDS : 82-0512) และควอตซ์ (JCPDS : 83-0539) ในเฟสแก้ว ซึ่งการซินเทอร์ที่ 950 องศาเซลเซียส ทำให้ความเป็นผลึกของคริสโตแบไลต์ และควอตซ์สูงขึ้น เนื่องจากความเข้มพีคหลักของคริสโตแบไลต์ที่ตำแหน่ง 2θ = 21.762 องศา และของควอตซ์ที่ตำแหน่ง 2θ = 26.593 องศา ชัดเจนขึ้น ขณะที่ความเป็นผลึกของโวลลาสโทไนต์ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับคริสโตแบไลต์และควอตซ์

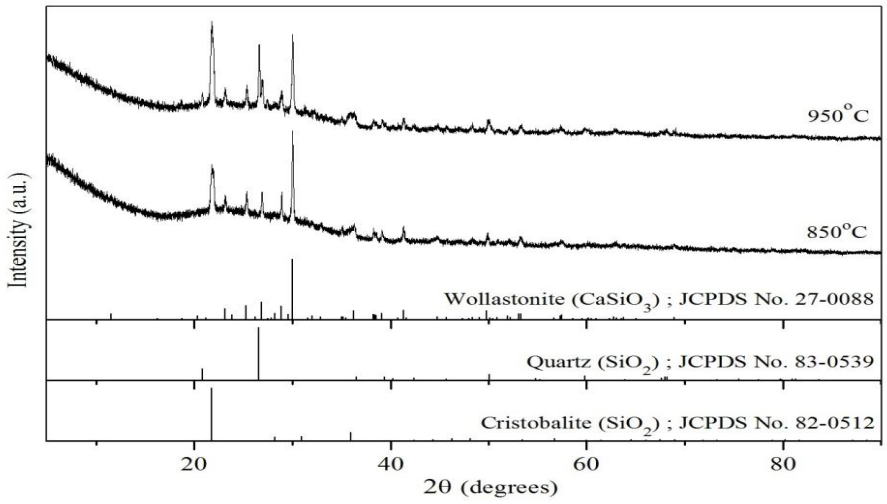


Figure 1 XRD pattern and phase identification of glass ceramics without nucleating agent.

เมื่อใช้สารก่อผลึกร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ผสมเศษแก้วโซดาไลม์ ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส (Figure 2 and Figure 3) จะพบเฟสโวลลาสโทไนต์โดยมีทั้งคริสโทแบไลต์และควอตซ์ปะปนในเฟสแก้ว ทั้งนี้การใช้สารก่อผลึกร้อยละ 20 โดยน้ำหนักนั้น คาดว่าสัดส่วนผลึกโวลลาสโทไนต์เมื่อเทียบกับคริสโทแบไลต์และควอตซ์มีมากกว่ากรณีการใช้สารก่อผลึกเพียงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จะพบเฉพาะเฟสโวลลาสโทไนต์และคริสโตแบไลต์ปะปนในเฟสแก้ว โดยตัวอย่างซึ่งผสมสารก่อผลึกร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบเฟสคริสโทแบไลต์น้อยมาก (Figure 3) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการซินเทอร์เป็น 1050 องศาเซลเซียส พบเฉพาะเฟสโวลลาสโทไนต์เท่านั้นในเฟสแก้ว (Figure 4)

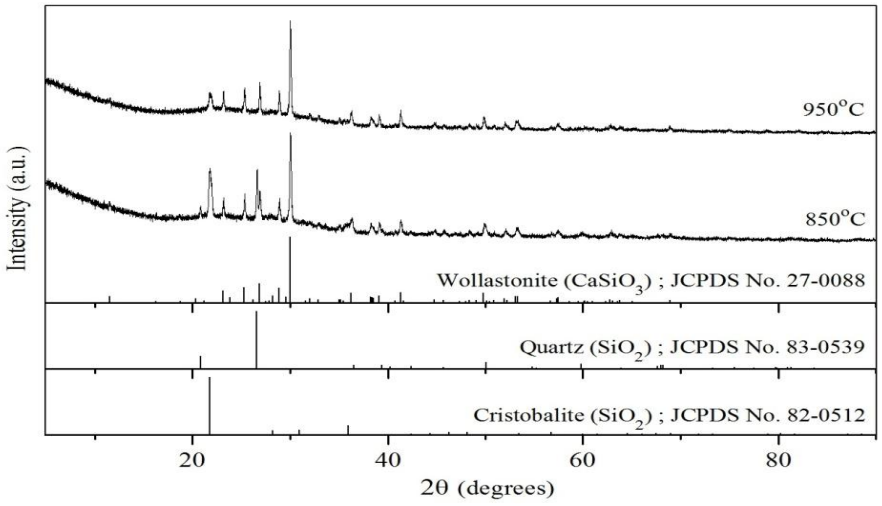


Figure 2 XRD pattern and phase identification of glass ceramics with nucleating agent 10 wt%

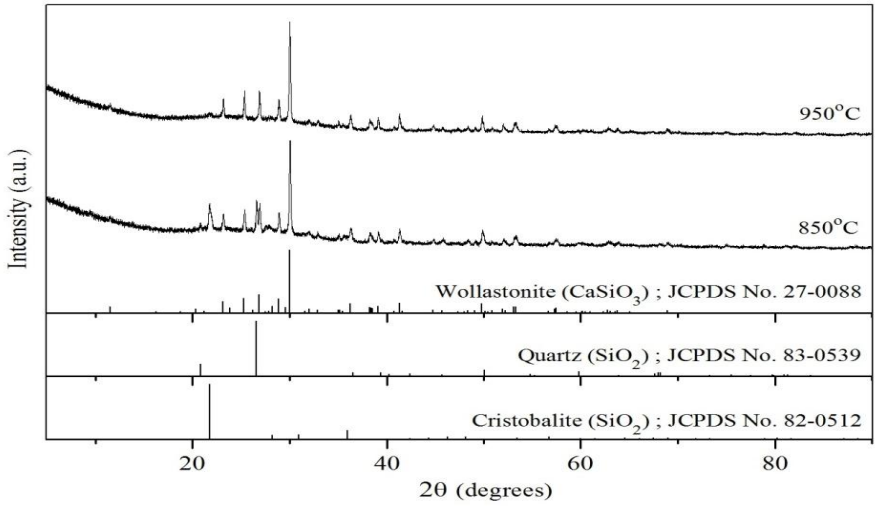


Figure 3 XRD pattern and phase identification of glass ceramics with nucleating agent 20 wt%

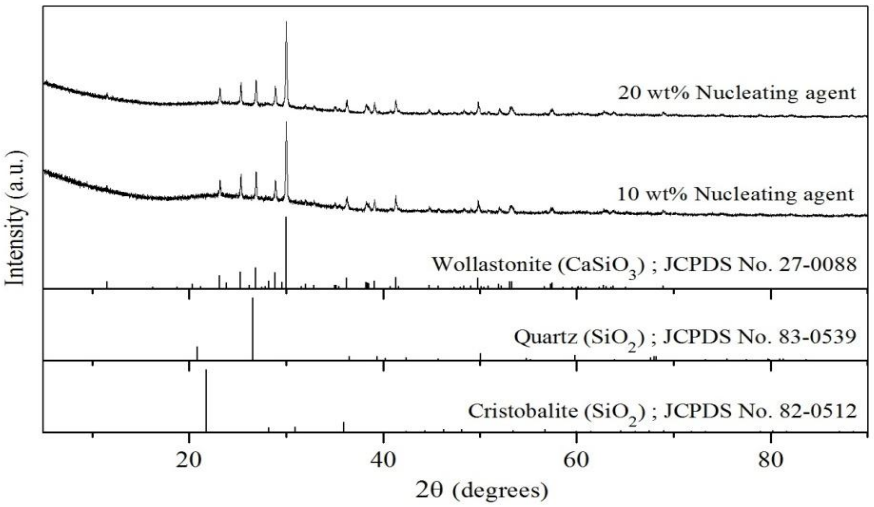


Figure 4 XRD pattern and phase identification of glass ceramic sintered at 1050 °C.

ตัวอย่างที่เตรียมจากเศษแก้วโซดาไลม์และเศษแก้วโซดาไลม์ผสมสารก่อผลึก จะพบอนุภาคลักษณะคล้ายแท่งเข็มกระจายทั่วทั้งพื้นผิวหน้า (Figure 5) โดยพื้นผิวของตัวอย่างที่เตรียมโดยใช้สารก่อผลึก (Figure 5b and Figure 5c) ปรากฏอนุภาคแท่งเข็มมีความละเอียดกว่าที่พบบนพื้นผิวของเศษแก้วโซดาไลม์ (Figure 5a)

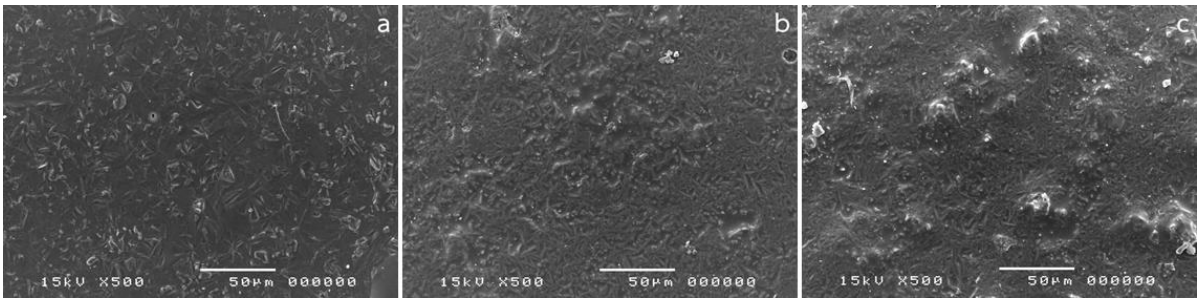


Figure 5 SEM of glass ceramic sintered at 950 °C (a) without nucleating agent, (b) nucleating agent 10 wt% and (c) nucleating agent 20 wt%.

ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบจากเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างที่เตรียมจากเศษแก้วโซดาไลม์ ผ่านการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส พบว่ามีผลึกขนาดเล็กของคริสโตแบไลต์หรือควอตซ์ (Figure 6a) ฝังตัวในเนื้อแก้ว (Figure 6b) แต่กรณีการใช้เศษแก้วโซดาไลม์ผสมสารก่อผลึกและผ่านการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส พบธาตุองค์ประกอบของส่วนที่เป็นผลึก คือ แคลเซียม โซเดียม ซิลิกอน และออกซิเจน (Figure 7(a) and Figure 8(a)) ซึ่งเชื่อว่าเป็นผลึกโวลลาสโทไนต์ ($CaSiO_3$) โดยมีโซเดียมอะตอมเข้าแทนที่แคลเซียมอะตอม และ/หรือ เข้าแทรกในโครงสร้างของผลึกโวลลาสโทไนต์ เนื่องจากขนาดโซเดียมอะตอม (r=1.86 Å) ใกล้เคียงกับขนาดแคลเซียมอะตอม (r=1.80 Å) ทั้งยังมีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีไม่ต่างกันมาก (Na=0.93, Ca=1.0 Pauling scale) (Chang et al., 2000) บริเวณล้อมรอบผลึกเป็นส่วนของเนื้อแก้วซึ่งพบธาตุองค์ประกอบเป็น แคลเซียม โพแทสเซียม ซิลิกอน อะลูมิเนียม แมกนีเซียม โซเดียม และออกซิเจน (Figure 7(b) and Figure 8(b))

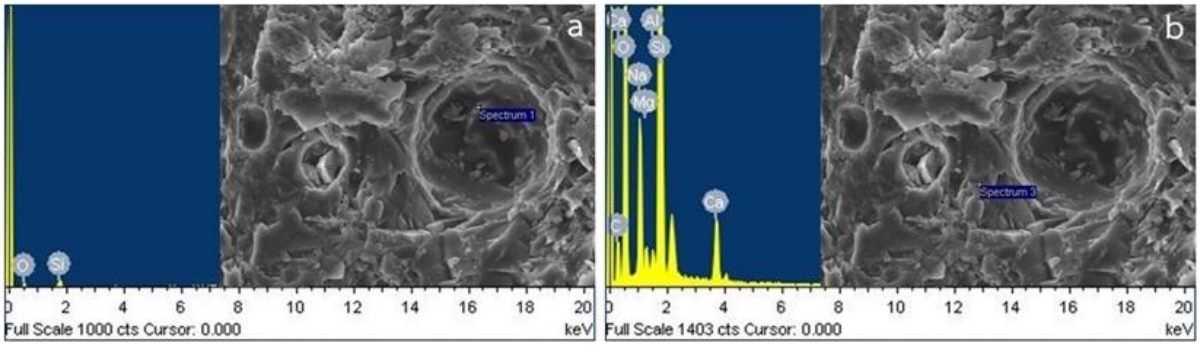


Figure 6 EDX spectra of glass ceramic without nucleating agent sintered at 950 °C (a) at a selected crystal and (b) at glass matrix

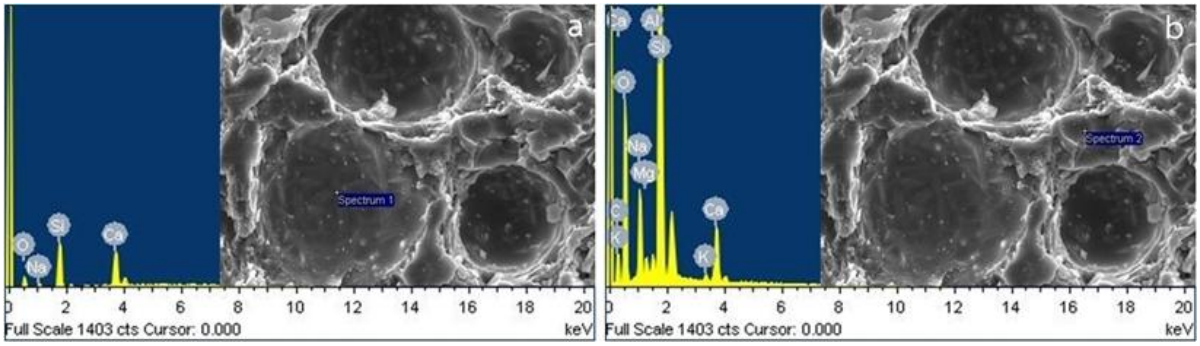


Figure 7 EDX spectra of glass ceramic with nucleating agent 10wt% sintered at 950 °C (a) at a selected crystal and (b) at glass matrix

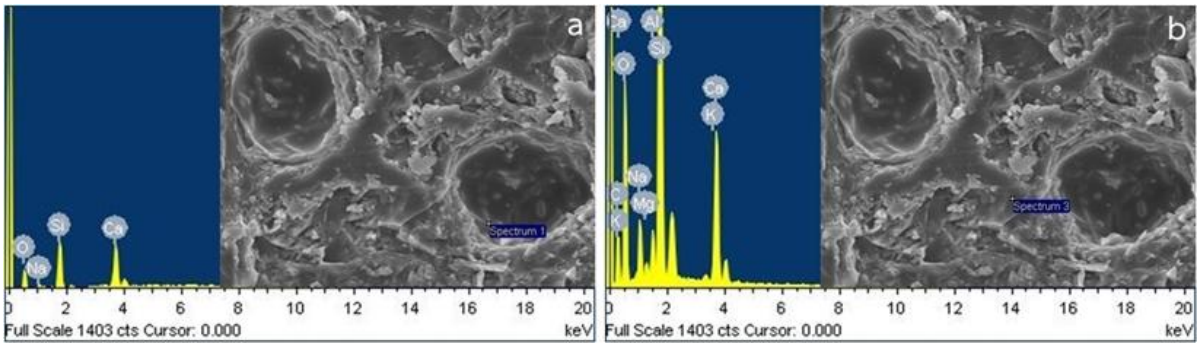


Figure 8 EDX spectra of glass ceramic with nucleating agent 20wt% sintered at 950 °C (a) at a selected crystal and (b) at glass matrix

สรุป

กลาสเซรามิกที่เตรียมจากการผสมสารก่อผลึกซึ่งสังเคราะห์จากผงเปลือกไข่เผาและเพอร์ไลต์ขยายตัวผสมกับเศษแก้วโซดาไลม์ เมื่อซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส พบผลึกโวลลาสโทไนต์ คริสโทแบไลต์และควอตซ์ปะปนในเนื้อแก้ว ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส พบผลึกโวลลาสโทไนต์และ คริสโทแบไลต์ในเนื้อแก้ว และที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส พบเฉพาะผลึกของโวลลาสโทไนต์เท่านั้น ผลจากการใช้สารก่อผลึกร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จะพบการปะปนของผลึกคริสโตแบไลต์ต่ำกว่ากรณีการใช้สารก่อผลึกร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขณะที่การซินเทอร์ผงเศษแก้วโซดาไลม์ที่ไม่เติมสารก่อผลึกจะพบผลึก ของโวลลาสโทไนต์ คริสโทแบไลต์และควอตซ์ปะปนร่วมกันอยู่ในเฟสแก้ว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพนักศึกษาสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนการเข้าร่วมนำเสนอผลงานทางวิชาการ

เอกสารอ้างอิง

พรพิมล เขียวภูมี, นภัสถ์ จันทร์มี และ รัชดาภรณ์ ปันทะรส. 2557. ผลของอัตราส่วนโดยโมล $CaO-SiO_2$ ต่อการเกิดเฟสวอล์ลาสโทไนต์ , น. 90-97. *ใน* **รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52 (สาขาวิทยาศาสตร์)**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

Aloisi, M., Karamanov, A., Taglieri, G., Ferrante, F., Pelino, M. 2006. Sintered glass ceramic composites from vitrified municipal solid waste bottom ashes. **Journal of Hazardous Materials**. 137, 138-143.

Binhussain, M.A., Colombo, P., Bernardo, E., Binmajed, M.A., Marangoni, M., Atalasi, H.H., Alajmi, M.A. 2014. Method for manufacturing glass-ceramic composite. United States Patent No. US2014/0191448 A1, July 2014.

Chang, C.K., Mao, D.L., Wu, J.S. 2000. Characteristics of crystals precipitated in sintered apatite/ wollastonite glass ceramics. **Ceramics International**. 26, 779-785.

Cheng, T.W., Ueng T.H., Chen Y.S., Chiu J.P. 2002. Production of glass-ceramic from incinerator fly ash. **Ceramics International**. 28, 779–783.

Cheng, T.W., Chen Y.S. 2004. Characterisation of glass ceramics made from incinerator fly ash. **Ceramics International**. 30, 343–349.

Javed, S.H., Naveed, S., Tajwar, S., Shafaq, M., Kazmi, M., Feroze, N. 2009. Synthesis of wollastonite from agro-waste. **Journal of Agricultural Research**. 47, 319-327.

Nour, W.M.N., Mostafa, A.A., Ibrahim, D.M., 2008. Recycle wastes as precursor for synthesizing wollastonite. **Ceramics International**. 34, 101-105.

Vichaphund, S., Kitiwan, M., Atong, D., Thavorniti, P. 2011. Microwave synthesis of wollastonite powder from eggshell. **Journal of the European Ceramic Society**. 31, 2435-2440.

Yoon, S.D., Lee, J.U., Lee, J.H., Yun, Y.H., Yoon, W.J. 2013. Characterization of wollastonite glass ceramics made from waste glass and coal fly ash. **Journal of Materials Science & Technology**. 29(2), *149*-153.

Zhang, W., Liu, H. 2013. A low cost route for fabrication of wollastonite glass–ceramics directly using soda-lime waste glass by reactive crystallization–sintering. **Ceramics International**. 39, 1943-1949.

การศึกษาพารามิเตอร์กายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

The Study of Physical Parameters Affecting on the Temperature Inside the Cement Rounds for Bhutan Oyster Mushroom Cultivation Based on the Pot-in-Pot Refrigerator Model

นานทรี หุ้นเหี้ยง[1*] วิโรจน์ เครือภู่[1] และ อรรถพล เชยศุภเกตุ[1]

Nantaree Hunhiang[1*], Wirote Kruapoo[1] and Attapol Choeysuppaket [1]

บทคัดย่อ

อุณหภูมิภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพต่างๆ ที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนและมวลน้ำ การศึกษานี้ได้ใช้แนวคิดตามหลักการทำความเย็นด้วยการระเหยน้ำที่เกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากด้านนอกมีค่ามากกว่าการนำความร้อนในทรายเปียก และได้คำนวณตามหลักการอนุรักษ์มวลและพลังงานในสภาวะคงตัว เพื่อวิเคราะห์ผลจากการแปรค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยทางกายภาพที่มีต่ออุณหภูมิภายในวงบ่อซีเมนต์ ซึ่งช่วยให้ทราบความเป็นไปได้ในการนำไปสร้างห้องเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน ทั้งนี้ มีการกำหนดข้อมูลที่นำมาใช้ในช่วงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 – 40 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 20 – 80 % และให้มีการสูญเสียความร้อนทางด้านบนและด้านล่างของห้องเพาะเลี้ยง มีค่าอยู่ในช่วง 7 – 13 W พบว่า อุณหภูมิภายในวงบ่อซีเมนต์จะมีค่าแปรผันอยู่ในช่วงประมาณ 15 – 35 °C ซึ่งสอดคล้องกับช่วงอุณหภูมิที่เห็ดนางฟ้าภูฐานเจริญเติบโตได้ดี

ABSTRACT

Temperature in the Bhutan Oyster mushroom cultivation cement rounds based on the pot-in-pot refrigerator model depends on the physical properties, affecting thermal and heat transfer. This research has the concept of the evaporating cooling principle, which due to the summation of natural convection and radiation, at the outer surface of outer cement round, is greater than the heat conduction in wet sand layer. All calculations are based on mass and energy conservation principle, in steady state. We aim to analyze effects of the physical properties and to know the possibility for creating the Bhutan Oyster mushroom cultivating cement rounds based on the pot-in-pot refrigerator model. However, we set up the considered cases at a variety of ambient temperature 25 – 40 °C, relative humidity 20 – 80 %, and total respiratory cooling load and leaking about 7 – 13 W. Finally, we find that the preservation temperature in cement rounds is about 15 – 35 °C, and importantly, corresponding to the good temperature interval for Bhutan Oyster mushroom cultivation.

Key Words: Heat and Mass Transfer, Bhutan Oyster Mushroom Cultivating, Cement Rounds, Pot-in-Pot Refrigerator

* Corresponding author; e-mail address: krunantaree@gmail.com

[1]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

[1]Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 20131, Thailand

คำนำ

A.W. Date (2012) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพอุณหพลวัตและอุณหภูมิในหม้อดินเก็บความเย็น (Pot-in-Pot Refrigerator) ซึ่งมาจากการแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการถ่ายโอนความร้อนและมวลผ่านผนังหม้อ โดยใช้แบบจำลองการไหลของเรย์โนลด์ (Reynolds' Flow Model) และกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) พบว่าอุณหภูมิภายในหม้อที่เก็บไว้ได้จะผันแปรอยู่ในช่วง 23.06 – 37.33 °C ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมภายนอกอยู่ระหว่าง 35 – 45 °C และ 30 – 50 % ตามลำดับ

การศึกษาครั้งนี้ สนใจการนำทฤษฎีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับงานในประเทศไทย ซึ่งในปัจจุบันมีความนิยมใช้โอ่งดินหรือวงบ่อซีเมนต์เป็นสถานที่เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน (Bhutan Oyster Mushroom) กันในระดับครัวเรือนอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้ โอ่งและวงบ่อซีเมนต์ต่างก็มีความแข็งแรง ทึบแสง และกักเก็บความชื้นไว้ได้ในระดับหนึ่ง แต่ผู้เพาะเลี้ยงก็ยังต้องหมั่นรดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิและรักษาความชื้นในที่เพาะเลี้ยงไว้เสมอ จากการศึกษาพบว่าเห็ดนางฟ้าภูฐานจะเจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศที่มีแสงสว่างพอเหมาะ อุณหภูมิประมาณ 25 – 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 70 – 80 % ดังนั้น จึงมุ่งศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยกายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น ซึ่งมีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนและมวลผ่านผนังซีเมนต์ เพื่อให้ทราบความเป็นไปได้ที่จะนำไปศึกษาการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การกำหนดชื่อ สัญลักษณ์ และหน่วย

A	พื้นที่ผิว (m^2)
B	เลขสปัลดิง
b	ความหนาของผนังหม้อ/วงบ่อซีเมนต์ (m)
Bi	เลขบิโอต์
Cp	ความร้อนจำเพาะ (J/kg-K)
COP	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ
g	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (kg/m^2-s)
H	ความสูงของหม้อ/วงบ่อซีเมนต์ (m)
h	เอนทาลปีของสารผสม (J/kg)
k	สภาพนำความร้อน (W/m-K)
$\dot{m}$	อัตราการระเหยน้ำ (kg/s)
Q	อัตราการถ่ายโอนความร้อน (W)
T	อุณหภูมิ (°C)
r	รัศมีทรงกระบอก (m)

Greek symbols

α	สัมประสิทธิ์ถ่ายโอนความร้อน (W/m^2-K)
ω	สัดส่วนมวล

Suffixes

a	อากาศ
con	คอนกรีต
$cold$	สิ่งแวดล้อมภายในหม้อใน
dp	จุดน้ำค้าง
e	หลักการอนุรักษ์พลังงาน
eff	ทรายเปียก
i	หม้อใน/วงบ่อซีเมนต์ใน
in	ผลรวมของการแผ่รังสีและการพาความร้อน
$load$	ภาระการทำความเย็น
m	หลักการอนุรักษ์มวล หรือ ค่าเฉลี่ย
M	สถานะสารที่ถูกถ่ายโอน
nc	การพาความร้อนธรรมชาติ
o	หม้อนอก/วงบ่อซีเมนต์นอก
rad	การแผ่รังสีความร้อน
ref	ค่าอ้างอิง
v	ไอน้ำ

η_{th}	ประสิทธิภาพอุณหพลวัต	w	สถานะน้ำ (ของเหลว)
Φ	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	∞	สิ่งแวดล้อม

2. แบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น

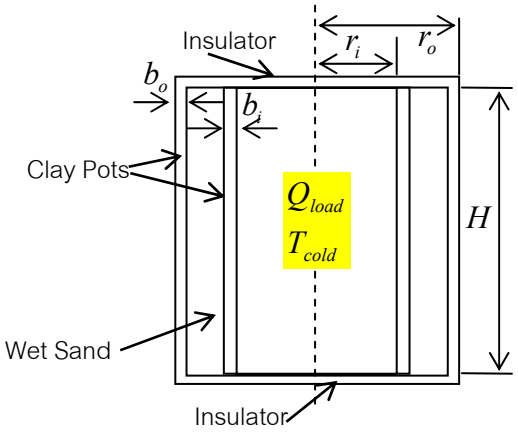


Figure 1 Pot-in-pot refrigerator model.

Source: A.W. Date (2012)

การศึกษาแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็นได้พิจารณาหม้อเป็นรูปทรงกระบอก ดังที่แสดงใน Figure 1 ในการทำให้อุณหภูมิภายในต่ำกว่าอุณหภูมิในสิ่งแวดล้อมต้องอาศัยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก $\left(Q_{in} = Q_{rad} + Q_{nc}\right)$ ช่วยในการทำให้น้ำในทรายระเหยออกไป ในขณะที่ภายในหม้อนั้นมีการคายความร้อนมาจากอาหารที่เก็บไว้ $\left(Q_{load}\right)$ โดยได้พิจารณาตามกระบวนการในสภาวะคงตัวซึ่งถือว่าเป็นการถ่ายโอนความร้อนและมวลน้ำแบบย้อนกลับไม่ได้ ในการศึกษาดังกล่าวจึงต้องคำนวณหาค่า T_{cold}, $\eta_{th} = \left(T_{\infty} - T_{cold}\right)/\left(T_{\infty} - T_{dp}\right)$ และ $COP = Q_{load}/Q_{in}$ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐาน

สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยกายภาพที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น จึงใช้กระบวนการเดียวกับแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น แต่มีการปรับค่าสมบัติกายภาพของวัสดุจากดินเป็นคอนกรีต และขนาดของวงบ่อซีเมนต์ รวมไปถึงใช้แบบจำลองการไหลของเรย์โนลด์ กฎของดาร์ซี และหลักการอนุรักษ์มวลและพลังงาน

3. วิธีการทดสอบทฤษฎีและวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 แบบจำลองการไหลของเรย์โนลด์

ในการพิจารณาการถ่ายโอนมวลน้ำ ผ่านผิว w-w ได้ใช้แบบจำลองการไหลของเรย์โนลด์ดังที่แสดงใน Figure 2 โดยกำหนดให้น้ำที่ถ่ายโอนมีอุณหภูมิและความเข้มข้นสม่ำเสมอซึ่งต้องใช้ค่าเฉลี่ยในสภาวะจินตภาพ M-M และกำหนดความกว้างของเฟสที่พิจารณาวัดจากผิว w-w ไปยังผิวจินตภาพ ∞□-∞ เมื่อ□ Q_L คือการนำความร้อนในชั้นทรายเปียก ทั้งนี้ มีสมมติฐาน 2 ประการ คือ การไหลของมวล gA_o ข้ามผิว ∞-∞ ไปยังผิว w-w แต่มีสมบัติตามสภาวะ ∞ และ การไหลของมวล $gA_o + m_w$ ข้ามผิว ∞-∞ ไปจากผิว w-w แต่มีสมบัติตามสภาวะ w

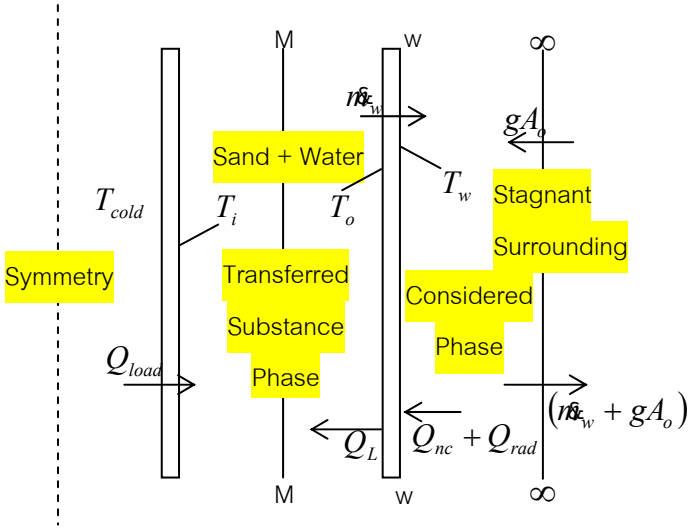


Figure 2 Reynolds' Flow Model.

Source: A.W. Date (2012)

3.2 หลักการอนุรักษ์มวล

การพิจารณาอัตราการระเหยของน้ำระหว่างพื้นผิว w-w และ ∞-∞ ตามหลักการอนุรักษ์มวล เขียนให้อยู่ในพจน์การคูณเลขสปัลดิง ซึ่งขึ้นกับสัดส่วนมวลไอน้ำ ดังในสมการ (1) (A.W. Date, 2012) ภายใต้เงื่อนไขการถ่ายโอนมวลและความร้อนที่เกิดขึ้นพร้อมกัน

$$\dot{m}_{w,m} = gA_0 \times B \qquad \text{เมื่อ} \qquad B = \frac{\omega_{v,\infty} - \omega_{v,w}}{\omega_{v,w} - 1} \tag{1}$$

นอกจากนี้ ยังมีความต้านทานที่เกิดจากความสูงของวงบ่อซีเมนต์ที่จะส่งผลต่ออัตราการระเหยของน้ำอีกด้วย จากกฎของดาร์ซีจะสามารถเขียนในรูปเดียวกับสมการ (1) ได้ดังสมการ (2) (A.W. Date, 2012)

$$\dot{m}_{w,m} = gA_o \times B^* \qquad \text{เมื่อ}$$

$$B^* = \frac{(0.622 - 0.0189H)\omega_{v,\infty} - 0.622(1 + 0.05H)}{(0.622 - 0.0189H)(\omega_{v,w} - 1) - Bi_m(0.622 + 0.378\omega_{v,w})} \tag{2}$$

3.3 หลักการอนุรักษ์พลังงาน

จากการพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนระหว่างพื้นผิว ∞-∞ และพื้นผิว w-w จะได้ดังสมการ (3) (A.W. Date, 2012)

$$\dot{m}_{w,e} = \frac{Q_{rad} + Q_{nc} + gA_o(h_\infty - h_w)}{h_{Mw} - h_w} \tag{3}$$

เมื่อทราบค่า T_w จะสามารถคำนวณ T_{cold} ดังสมการ (4) (A.W. Date, 2012) ซึ่งจะสามารถนำไปหา η_{th} เพื่อตรวจสอบสมมติฐานได้

$$T_{cold} = T_w - \left[\frac{b_o}{k_{con}A_o} + \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{eff}A_i}\right] \times (Q_{rad} + Q_{nc}) \times \left[1 + \frac{\dot{m}_w Cp_w}{2}\left\{\frac{2b_o}{k_{con}A_o} + \frac{r_i \ln(r_o/r_i)}{k_{eff}A_i}\right\}\right]^{-1} + \frac{Q_{load}}{A_i}\left[\frac{1}{\alpha_i} + \frac{b_i}{k_{con}}\right] \quad (4)$$

3.4 ขั้นตอนการหาคำตอบ

ในการคำนวณหาค่า T_{cold} และค่าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยกายภาพตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา ต้องใช้ T_w ที่ไม่ทราบค่า จึงจำเป็นต้องใช้การสมมติค่า T_w ขึ้นมาทดสอบก่อน ดังมีขั้นตอนต่อไปนี้

1. สมมติค่า T_w และหาค่า $\omega_{v,w}$ (M. Crawford and W.M. Kays, 1993)
2. หาค่าเฉลี่ย $\omega_{v,mean} = 0.5(\omega_{v,\infty} + \omega_{v,w})$ แล้วหาค่า $Cp_m = Cp_a(1-\omega_{v,mean}) + Cp_v\omega_{v,mean}$
3. หาค่า α_o (W.H. McAdams, 1954) ซึ่งสำหรับการพาความร้อนธรรมชาติจากผิวแนวดิ่ง จะได้เลขนัตเซิล เลขกราชฮอฟ และเลขพรินเดิล ดังความสัมพันธ์ $Nu_H = 0.59(Gr_H \Pr)^{0.25}$ เมื่อ

$$Nu_H = \frac{\alpha_o H}{k_a} \quad \text{และ} \quad Gr_H = \frac{9.81\beta(T_\infty - T_w)H^3}{v_a^2}$$

เมื่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร $\beta = 1.0/T_{mean}$ และ $T_{mean} = 0.5(T_w + T_\infty)$ (K) แล้วหาค่า k_a และ v_a ที่อุณหภูมิเฉลี่ย T_{mean}

4. เมื่อทราบ α_o หาค่า g (A.W. Date, 2012) และจะได้ Bi_m, B^* และ $\dot{m}_{w,m}$ จากสมการ (2)
5. หาค่า $(Q_{rad} + Q_{nc}) = (\alpha_{rad} + \alpha_o)A_o(T_\infty - T_w)$ เมื่อ $\alpha_{rad} = \varepsilon\sigma(T_\infty^2 + T_w^2)(T_\infty + T_w)$
6. หาค่า $\dot{m}_{w,e}$ จากสมการ (3)
7. คำนวณความคลาดเคลื่อนของ $\dot{m}_w$ จากทั้งสองวิธี จนได้ค่าไม่เกิน 0.01 % แล้วจึงสามารถคำนวณหาคำตอบต่างๆ ที่ต้องการได้ ได้แก่ T_{cold} ดังในสมการ (4) และค่าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง (A.W. Date, 2012)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การกำหนดตัวแปรควบคุม

Table 1 Parametric values reference case

Geometry (m)	Specific Heat (J/kg-K)	Thermal Conductivity (W/m-K)	Hydraulic Conductivity (m/s)	Others
$r_i = 0.4$ $r_o = 0.6$ $b_i = b_o = 0.05$ $H = 0.5$	$Cp_a = 1{,}007$ $Cp_v = 1{,}872$ $Cp_w = 4{,}179$	$k_a = 0.027$ $k_{con} = 1.73$ $k_{eff} = 2.0$	$K_H = 6\times10^{-12}$	$Q_{load} = 10$ W $v_a = 15.95\times10^{-6}$ m^2/s $T_{ref} = 273.15$ K $\lambda_{ref} = 2{,}503$ kJ/kg

ในการศึกษานี้ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นกรณีอ้างอิง ดังที่แสดงใน Table 1 เมื่อ υ_a คือความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ และสำหรับค่าสถาพการนำความร้อนของคอนกรีตจะมีช่วงกว้างขึ้นอยู่กับสภาพและ

ส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ค่าสำหรับคอนกรีตมอตาร์ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.73 W/m-K (W.H. McAdams, 1954)

2. การคำนวณกรณีอ้างอิง

ผลการทดสอบทฤษฎีในแบบจำลองที่ศึกษา ดังข้อมูลใน Table 2 โดยกำหนดสภาวะที่เป็นไปได้ คือ $T_\infty = 30\,^\circ\text{C}$ และ $\Phi_\infty = 40\,\%$ สำหรับกรณี $Q_{load} = 10$ W เมื่อคำนวณหาค่า T_w ที่ยอมรับได้ แล้วใช้คำนวณค่าอื่นๆ จะพบว่า $T_i < T_o < T_w$, $T_{cold} > T_i$ และ $T_{dp} < T_{cold}$ ตามสมมติฐาน ซึ่งส่งผลให้ได้ $\eta_{th} = 0.6330$ ที่เป็นไปได้ อีกทั้ง จะพบว่า $Q_L > Q_{in}$ และ $(Q_{in} + Q_{load}) > Q_L$ ซึ่งส่งผลให้ได้ $COP = 0.1116$ ที่เป็นไปได้ นอกจากนี้ จะพบว่า $\alpha_{nc} < \alpha_{rad}$ ซึ่งแสดงถึงการมีผลจากการแผ่รังสีความร้อนมาเกี่ยวข้องด้วย สอดคล้องกับที่ได้ $T_w = 24.5539\,^\circ\text{C}$, $\omega_{v,w} = 0.01949$ และเลขสปัลดิง $B = 0.009173$ ลดลงเป็น $B^* = 2.1735 \times 10^{-6}$ อันเป็นผลมาจากความต้านทานดาร์ซี และสุดท้ายจะพบว่า ค่าเลขบิโอต์การถ่ายโอนมวล $Bi_m >> 1$ ทั้งหมดที่กล่าวมานี้ แสดงให้เห็นว่าทฤษฎีในการคำนวณและวิเคราะห์แบบจำลองนี้ใช้ได้จริง

Table 2 Results for the reference case : $T_\infty = 30\,^\circ\text{C}$, $\Phi_\infty = 40\,\%$, $Q_{load} = 10$ W

$T_w = 24.5539$	$\dot{m}_w = 6.8040 \times 10^{-9}$	$\alpha_{nc} = 2.8236$	$g = 0.002768$
$T_o = 23.1801$	$Q_L = 99.5994$	$\alpha_{rad} = 5.9046$	$B = 0.009173$
$T_i = 17.3981$	$Q_{in} = 89.5996$	$Bi_m = 461{,}380.67$	$B^* = 2.1735 \times 10^{-6}$
$T_{cold} = 20.4464$	$COP = 0.1116$	$\eta_{th} = 0.6330$	$\omega_{v,w} = 0.01949$
$T_{dp} = 14.9068$			

3. ผลจากการแปรค่าพารามิเตอร์

3.1 ผลจากการแปรค่า T_∞ และ Φ_∞

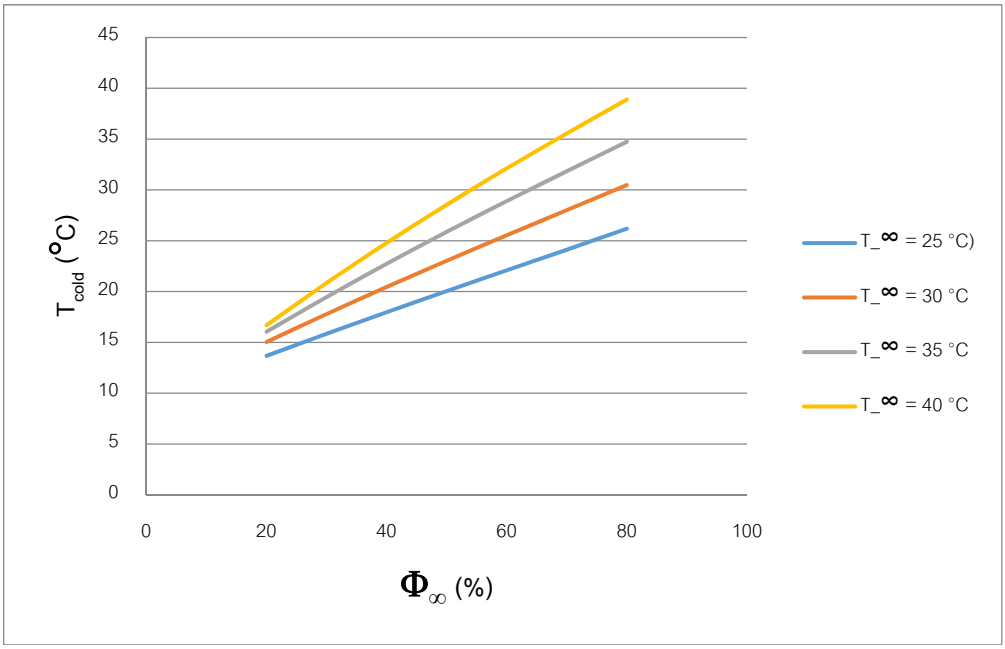


Figure 3 Typical variation of T_{cold} with Φ_∞.

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงการแปรค่า T_{cold} ในช่วงของ T_{∞} และ Φ_{∞} ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในประเทศไทย ดังที่ปรากฏใน Figure 3 จะเห็นว่าค่า T_{cold} มีแนวโน้มที่แปรผันตาม Φ_{∞} และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงที่ T_{∞} และ Φ_{∞} มีค่าสูง แต่อย่างไรก็ตาม ค่า T_{cold} ที่ได้มานั้น โดยภาพรวมถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐาน คือประมาณ 15 – 35 °C

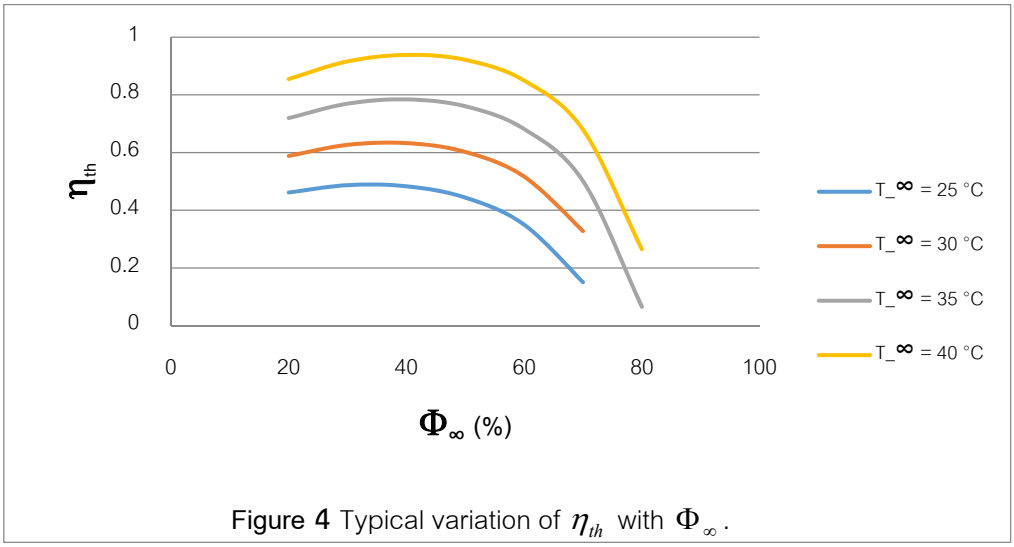


Figure 4 Typical variation of η_{th} with Φ_{∞}.

ในทำนองเดียวกัน เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงการแปรค่า η_{th} ในช่วงของ T_{∞} และ Φ_{∞} ดังที่ปรากฏใน Figure 4 จะเห็นว่าค่า η_{th} จะมีค่าสูงสุดในช่วงเมื่อ Φ_{∞} มีค่าประมาณ 40% และลดลงต่ำมากเมื่อ Φ_{∞} เพิ่มขึ้นถึง 80% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้ไม่สามารถอธิบายการใช้วงบ่อซีเมนต์เพาะเห็ดนางฟ้าในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มากกว่า 80%

3.2 ผลจากการแปรค่า Q_{load}

Table 4 Effects of Q_{load} at $T_{\infty}(ref) = 30$ °C

Q_{Load} (W)	$\Phi_{\infty} = 30$ %			$\Phi_{\infty} = 40$ %			$\Phi_{\infty} = 50$ %			$\Phi_{\infty} = 60$ %		
	COP	T_{cold}	η_{th}	COP	T_{cold}	η_{th}	COP	T_{cold}	η_{th}	COP	T_{cold}	η_{th}
7	0.0647	16.908	0.6718	0.0781	19.532	0.6936	0.0973	22.068	0.6852	0.1270	24.523	0.6347
8	0.0740	17.200	0.6568	0.0893	19.837	0.6734	0.1113	22.388	0.6575	0.1451	24.862	0.5954
9	0.0832	17.493	0.6418	0.1004	20.142	0.6532	0.1252	22.708	0.6299	0.1633	25.201	0.5560
10 (ref)	0.0925	17.785	0.6268	0.1116	20.446	0.6330	0.1391	23.028	0.6023	0.1814	25.541	0.5167
11	0.1017	18.078	0.6118	0.1228	20.751	0.6128	0.1530	23.348	0.5746	0.1995	25.880	0.4774
12	0.1109	18.370	0.5968	0.1339	21.056	0.5926	0.1669	23.668	0.5470	0.2177	26.219	0.4381
13	0.1202	18.663	0.5818	0.1451	21.361	0.5724	0.1808	23.988	0.5193	0.2358	26.558	0.3988

ข้อมูลใน Table 4 เมื่อให้ Q_{Load} เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าค่า T_{coal} และ COP เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า η_{th} ที่ลดลง สำหรับการเพาะเห็ดนางฟ้าภูฐาน เมื่อเห็ดงอกในระยะต่างๆ กันแล้ว ค่า Q_{Load} ย่อมเปลี่ยนไปตามปริมาณเห็ดที่งอก จึงกล่าวได้ว่า อุณหภูมิในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

3.3 ผลจากการแปรค่า k_{eff}

Table 5 Effects of k_{eff} (W/m-K) at $T_{\infty}(ref) = 30$ °C for $Q_{load} = 10$ W

k_{eff}	$\Phi_{\infty} = 30\,\%$			$\Phi_{\infty} = 40\,\%$			$\Phi_{\infty} = 50\,\%$			$\Phi_{\infty} = 60\,\%$		
(W/m-K)	COP	T_{cold}	η_{th}	COP	T_{cold}	η_{th}	COP	T_{cold}	η_{th}	COP	T_{cold}	η_{th}
1.0	0.0925	10.806	0.9850	0.1116	14.664		0.1391	18.388		0.1814	21.983	0.9290
1.5	0.0925	15.459	0.7462	0.1116	18.519	0.7607	0.1391	21.481	0.7359	0.1814	24.355	0.6542
2.0 (ref)	0.0925	17.785	0.6268	0.1116	20.446	0.6330	0.1391	23.028	0.6023	0.1814	25.541	0.5167
2.5	0.0925	19.181	0.5552	0.1116	21.603	0.5564	0.1391	23.956	0.5221	0.1814	26.252	0.4343
3.0	0.0925	20.112	0.5074	0.1116	22.374	0.5053	0.1391	24.575	0.4686	0.1814	26.726	0.3793
3.5	0.0925	20.777	0.4733	0.1116	22.924	0.4688	0.1391	25.017	0.4305	0.1814	27.065	0.3401

จากข้อมูลใน Table 5 เมื่อให้ค่า k_{eff} เพิ่มขึ้น จะได้ว่าค่า T_{cold} เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า η_{th} ที่ลดลง ทั้งนี้ ทรายเปียกที่ใช้จะมีค่า k_{eff} แปรไปตามส่วนผสมและการระเหยของน้ำ จึงกล่าวได้ว่า อุณหภูมิในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

4. ผลจากการแปรค่า k_{con}

Table 6 Effects of k_{con} (W/m-K) at $T_{\infty}(ref) = 30$ °C for $Q_{load} = 10$ W

k_{con}	$\Phi_{\infty} = 30\,\%$			$\Phi_{\infty} = 40\,\%$			$\Phi_{\infty} = 50\,\%$			$\Phi_{\infty} = 60\,\%$		
(W/m-K)	COP	T_{cold}	η_{th}	COP	T_{cold}	η_{th}	COP	T_{cold}	η_{th}	COP	T_{cold}	η_{th}
0.8	0.0925	16.125	0.7120	0.1116	19.117	0.7211	0.1391	22.014	0.6899	0.1814	24.825	0.5996
1.2	0.0925	17.155	0.6592	0.1116	19.941	0.6664	0.1391	22.643	0.6355	0.1814	25.269	0.5482
1.73 (ref)	0.0925	17.785	0.6268	0.1116	20.446	0.6330	0.1391	23.028	0.6023	0.1814	25.541	0.5167
2.2	0.0925	18.091	0.6111	0.1116	20.691	0.6168	0.1391	23.214	0.5862	0.1814	25.672	0.5015
3.0	0.0925	18.390	0.5958	0.1116	20.931	0.6009	0.1391	23.397	0.5703	0.1814	25.801	0.4866
3.6	0.0925	18.527	0.5887	0.1116	21.041	0.5936	0.1391	23.481	0.5631	0.1814	25.860	0.4797

ข้อมูลใน Table 6 เมื่อให้ค่า k_{con} เพิ่มขึ้น จะได้ว่าค่า T_{cold} เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่า η_{th} ที่ลดลง ทั้งนี้ วงบ่อซีเมนต์ที่ใช้จะมีค่า k_{con} แปรไปตามสภาพและส่วนผสมของคอนกรีต จึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิในห้องเพาะเลี้ยงเห็ดยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

สรุป

1. จากการแปรค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวลและความร้อนของวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น ได้ค่า $0 < \eta_{th} < 1$ และ COP ที่เป็นไปได้ แสดงให้เห็นว่าทฤษฎีในการคำนวณและวิเคราะห์แบบจำลองนี้ใช้ได้จริง และจากที่พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิประมาณ 25 – 40 °C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 30 – 60 %

2. ปัจจัยทางกายภาพมีผลต่ออุณหภูมิในวงบ่อซีเมนต์ที่ใช้เพาะเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานตามแบบจำลองหม้อดินเก็บความเย็น โดยที่ T_∞ และ Φ_∞ นั้นมีผลเด่นชัดกว่า Q_{load}, k_{eff} และ k_{con} แต่อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในวงบ่อซีเมนต์นี้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดนางฟ้าภูฐาน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณสำหรับดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

บรรณ บูรณะชนบท. 2541. **การเพาะเห็ดนางรม-นางฟ้า**. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม, นนทบุรี.

บุญส่ง วงศ์เกรียงไกร. 2543. **เห็ดนางฟ้า**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์เกษตรบุ๊ค, นนทบุรี.

มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. **การถ่ายเทความร้อน**. พิมพ์ครั้งที่ 4. บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

มะลิ หุ่นสม. 2551. **ปรากฏการณ์ถ่ายโอนโมเมนตัม ความร้อน และมวลขั้นพื้นฐาน**. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

A.W. Date. 2012. Heat and mass transfer analysis of a clay-pot refrigerator. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 55 (2): 3977–3983.

Eckert & Drake. 1974. **Heat and Mass Transfer**. TATA McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi.

Frank P.Incropera and David P. DeWitt. 1996. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. John Wiley & Sons, New York.

Frank P. Incropera and other. 2013. **Principle of Heat and Mass Transfer**. 7th edition. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., Singapore.

I. F. Odesola and O. Onyebuchi. 2009. A Review of Porous Evaporative Cooling for the Preservation of Fruits and Vegetables. **The Pacific Journal of Science and Technology** 10 (2): 935-941.

M. Crawford and W.M. Kays. 1993. **Convective Heat and Mass Transfer**. McGraw-Hill Int Edition, New York.

W.H. McAdams. 1954. **Heat Transmission**. 3rd ed., McGraw-Hill, New York.

W. Wagner and A. Pruss. 1993. International equations for the saturation properties of ordinary water substance. revised according to the international temperature scale of 1990. **J. Phy. Chem. Ref. Data** 22 (3): 783–787.

การเปลี่ยนน้ำมันเครื่องใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

Conversion of Used Lubricating Oil to Liquid Fuels on Used FCC Catalyst in Continuous Reactor.

พรชนก แก้วเทวี[1] และ ธราพงษ์ วิทิตศานต์[2*]

Pornchanok Kaewtawee[1] and Tharapong Vitisant[2*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ 380-450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 3-9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50-150 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน พบว่า ภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 88.5 โดยน้ำหนัก

ABSTRACT

This research aims to study pyrolysis of used lubricating oil to liquid fuels over fluid catalytic cracking catalyst in 3 L continuous reactor to define the factors such as temperature of 380-450 °C, oil feed rate of 3-9 ml/min, N_2 flow rate of 50-150 ml/min and amount of catalyst of 30-60 % (by reactor volume) which affected to % yield of liquid oil products. The results showed that the temperature of 450 °C, feed rate of 9 ml/min, N_2 flow rate of 50 ml/min and amount of catalyst of 30 % (by reactor volume) were the optimum condition giving the highest liquid oil products of 88.5 % wt.

Key words: pyrolysis, lubricating oil, fluid catalytic cracking, continuous reactor

* Corresponding author; e-mail address: **tharapong.v@chula.ac.th**

[1] หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 10330

[1] Program in Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

[2] ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 10330

[2] Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

คำนำ

เนื่องจากปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นถูกนำมาใช้เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้แล้วจัดเป็นของเสียอันตรายและก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันมีการนำน้ำมันหล่อลื่นนำกลับมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในน้ำมันเตา และประยุกต์ใช้ในภาคการก่อสร้าง แต่ทั้งหมดนั้นไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และบางส่วนที่มีการจัดการเกี่ยวกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต้องใช้การลงทุนที่สูง แต่ถ้ามีการเก็บรวบรวมจะใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ จึงมีความพยายามค้นคว้าและวิจัยการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วซึ่งเป็นน้ำมันชนิดหนักมาแปรภาพใหม่เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีคุณค่าและนำกลับมาใช้ได้อีก (พนัส, 2557) โดยกระบวนการ ไพโรไลซิส คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อนในภาวะที่ปราศจาก ออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมากโดยเกิดการแตกของพันธะโมเลกุลในองค์ประกอบ จากสายโซ่พันธะเคมียาว ๆ กลายเป็นสายโซ่สั้น ๆ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบคาร์บอนระเหยได้จะกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง บางส่วนที่ถูกควบแน่นจะกลายเป็นน้ำมันเหลว (Bockhorn et al., 1998) ไพโรไลซิสเป็นวิธีที่มี ประโยชน์มากกว่าวิธีการอื่น ๆ และเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในมุมมองที่เกี่ยวกับพลังงาน คือผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส เช่น แก๊ส น้ำมันเหลว และของแข็งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ งานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการแปรรูปน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยกระบวนการไพโรไลซิสมักเป็นการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ที่มีความยาวให้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ซึ่งหากมีการควบคุมกระบวนการที่ดี จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิง

จากการศึกษางานวิจัยส่วนใหญ่การทำไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (กุณฑณี, 2554) ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพวกเชื้อเพลิงเหลวจะผสมอยู่กับน้ำมันหนักในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการออกจากน้ำมันหนักได้

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ทำจากวัสดุชนิดเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม มีปริมาตรความจุ 3 ลิตร ทนความร้อนได้ประมาณ 500 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกถูกวางในแนวนอน ภายในทรงกระบอกแกนกลางมีการติดตั้งใบกวนไว้ภายใน\

เครื่องมือวิเคราะห์วัตถุดิบและตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว โดยวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ก่อนทำการทดลองวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrophotometer (XRF) และเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ตามลำดับ

วิธีการทดลอง

เตรียมน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว โดยทำการกรองสิ่งสกปรก เช่น ฝุ่นละออง ตะกอนของแข็ง ด้วยกระดาษกรอง จากนั้นเตรียมเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตรให้พร้อมใช้งาน ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ตามตัวแปรที่ต้องการศึกษาเพื่อหาช่วงภาวะของตัวแปรต่างๆที่มีความเหมาะสมและศึกษาอิทธิพลของตัวแปรจากการทดลอง นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อและคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

Table 1 Factor and level of variable of cracking

Factor	Level		Unit
	Low (+)	High (-)	
Temperature	380	450	°C
oil feed rate	3	9	ml/min
N_2 flow rate	50	150	ml/min
amount of catalyst	30	60	%vol of reactor

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนการทดลอง

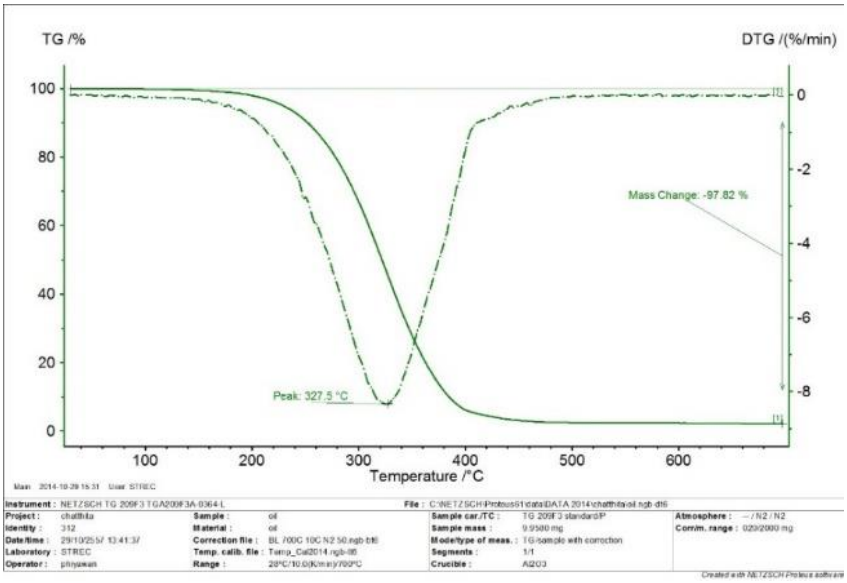


Figure 1 The decomposition temperature range of used lubricating oil by Thermogravimetric Analyzer (TGA) technique.

จากรูปที่ 1 แสดงอัตราการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จากกราฟจะเห็นว่าน้ำมันหล่อลื่นเริ่มแตกตัวที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 225 องศาเซลเซียส แต่ในการทดลองศึกษาอุณหภูมิในช่วง 380-450 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส ความร้อนที่ให้ทำให้น้ำมันมีการแตกตัวแต่เกิดการแตกตัวไม่สมบูรณ์จึงทำให้น้ำมันกลับมารวมตัวกัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

- **วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผาด้วยเทคนิค** XRF

Table 2 %Concentration of metal in used FCC catalyst before and after calcination at 550°C

Used FCC Catalyst		Used FCC catalyst after calcination at 550°C	
Element	% Concentration	Element	% Concentration
Na	0.58	Na	0.31
Al	42.07	Al	40.3
Si	40.13	Si	42.03
P	0.12	P	0.2
S	0.3	S	0.49
K	0.32	K	0.24
Ca	0.4	Ca	0.37
Ti	2.67	Ti	3.08
V	0.34	V	0.34
Mn	0.2	Mn	0.19
Fe	3.12	Fe	3.29
Ni	1.65	Ni	1.27
Cu	0.08	Cu	0.11
Zn	0.07	Zn	0.07
La	6.29	La	7.06
Ge	0.49	Ge	0.64
Ga	0.04	Ga	0.02

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าในตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผามีปริมาณธาตุ Si และ Al ที่มาก จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ด้วยเหตุนี้เองจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผามาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อหาว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นซีโอไลต์ชนิดใด

- **วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผาด้วยเทคนิค XRD**

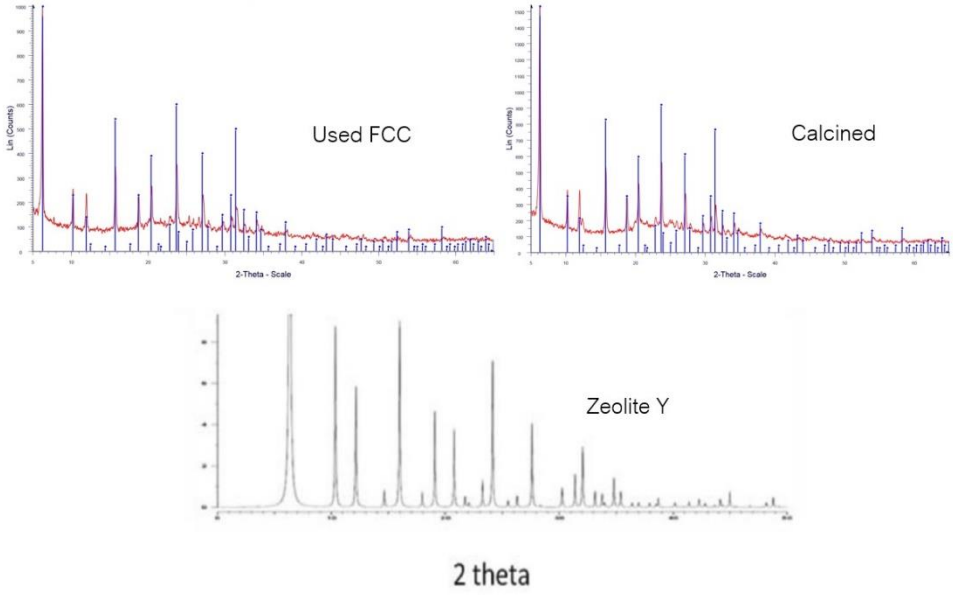


Figure 2 XRD pattern of Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated Catalyst, XRD pattern of used FCC catalysts, XRD pattern used FCC catalyst after calcination at 550°C

จากรูปพบว่าลักษณะพีคที่ปรากฏในรูป มีความใกล้เคียงกับลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา Zeolite Y ทำให้สามารถระบุได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีนี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประเภท Y

ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อการไพโรไลซีสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

- **ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว**

จากรูปที่ 3 (a) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 380 องศาเซลเซียสเป็น 450 องศาเซลเซียส จะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้นจาก 37.3 เป็น 84.14 โดยน้ำหนัก โดยเมื่อได้รับ ความร้อนสูงอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการแตกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสูงมากขึ้น ในขณะที่กากน้ำมันมีปริมาณสูงขึ้น เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้ในการแตกย่อยของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นอัลคีนในปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยา polymerization จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกากน้ำมันอยู่มาก และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว (b) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ดีเซลลดลงจากร้อยละ 47 เป็น 43 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพลของการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกย่อยของโมเลกุลสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนขนาด

ใหญ่จนได้โมเลกุลขนาดกลาง ต่อจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วก็จะเข้ามามีบทบาทในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กมากขึ้นทำให้ปริมาณดีเซลลดลง

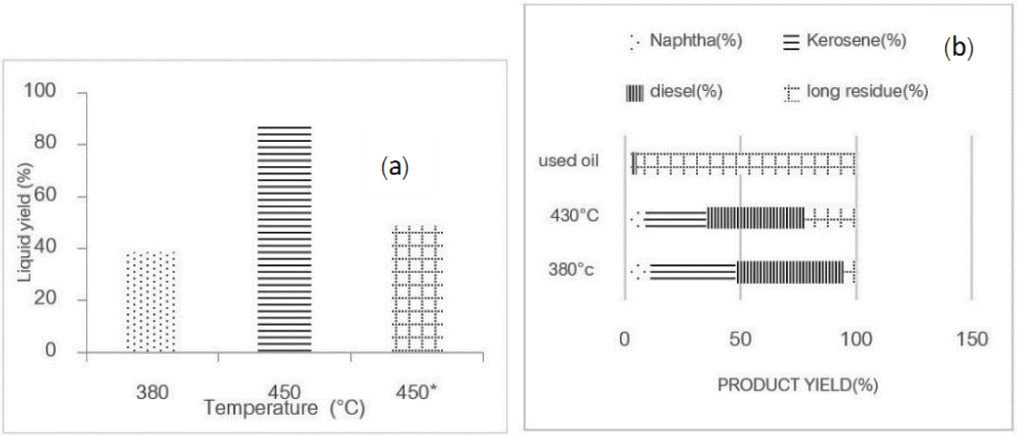


Figure 3 Effect of reaction temperature at 380, 450 °C, 60% of used FCC catalyst, oil feed rate 9 ml/min and N_2 flow rate 150 ml/min (* no catalyst)

- **ผลของอัตราการไหลของสารตั้งต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว**

จากรูปที่ 4 (b) เมื่ออัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้นจาก 80.14 เป็น 84.14 โดยน้ำหนัก และ (b) ผลิตภัณฑ์ดีเซลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 เป็น 43 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นสูงขึ้น ระดับความสูงของน้ำมันที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้นแต่ไม่เต็ม สารตั้งต้นจึงมีพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนมากขึ้นเกิดการแตกพันธะของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จนได้โมเลกุลขนาดเล็กมากขึ้น

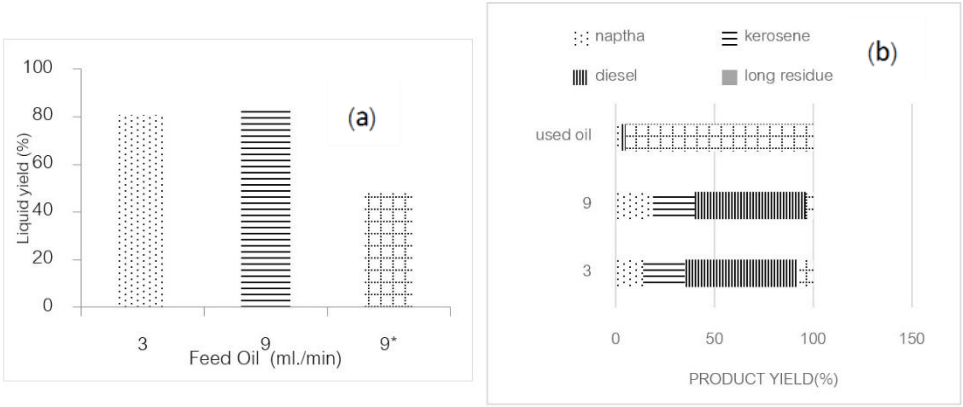


Figure 4 Effect of feed oil at 3, 9 ml/min,temperature 450 °C, 60% of used FCC catalyst and N_2 flow rate 150 ml/min (* no catalyst)

- **ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตเจนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว**

จากรูปที่ 5 (a) เมื่ออัตราการป้อนแก๊สตัวพาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดน้อยลงจาก 88.5 เป็น 84.14 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนแก๊สตัวพาในการทำปฏิกิริยา (b) ทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลจึงลดน้อยลง โดยร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลลดลงจาก 44 เป็น 43 โดยน้ำหนัก

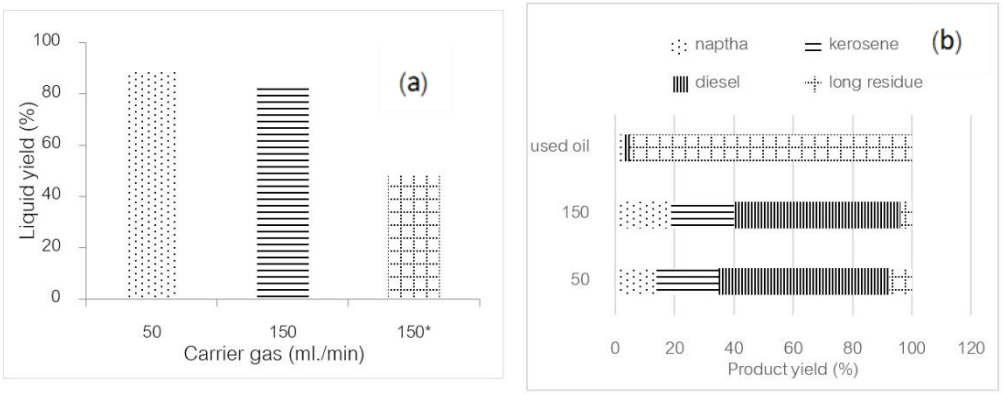


Figure 5 Effect of flow rate of carrier gas at 50,150 ml/min, temperature 450 °C 60% of used FCC catalyst and oil feed rate 9 ml/min (* no catalyst)

- **ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว**

จากรูปที่ 6 (a) เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำให้ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้น จาก 80.09 เป็น 84.14 โดยน้ำหนัก และปริมาณร้อยละผลได้ของดีเซล (b) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33 เป็น 43 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพในการสนับสนุนให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลที่เล็กลง ทำให้ได้องค์ประกอบดีเซลเพิ่มมากขึ้นและจะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวลดน้อยลง

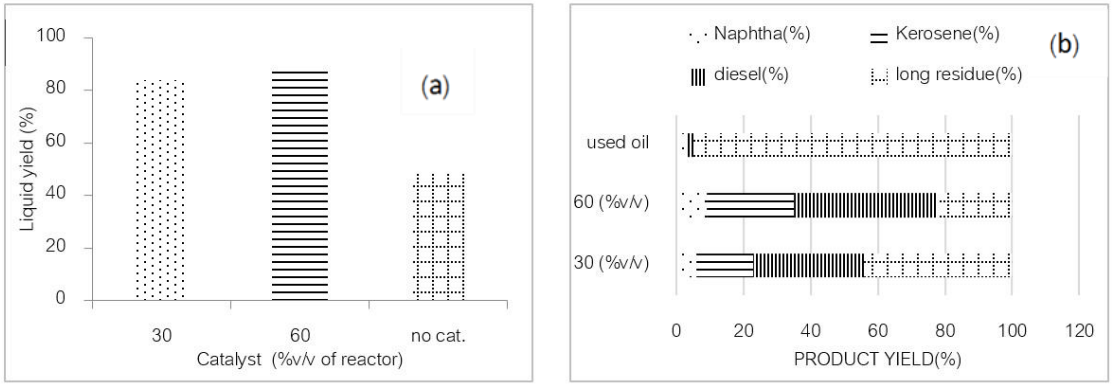


Figure 6 Effect of amount of catalyst 30, 60 %vol of reactor, flow rate of carrier gas at 150 ml/min, temperature 450 °C and oil feed rate 9 ml/min (* no catalyst)

สรุป

การศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 88.5 โดยน้ำหนัก และในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวน้อยกว่าในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเสมอ

เอกสารอ้างอิง

พนัส งามกนกวรรณ. 2557. **ปัญหาน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.diw.go.th

กุณฑณี ปิ่นเวหา. 2554. **การแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว**, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. **การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

Bockhorn, H., Hornung, A., Hornung, J. Stepwise. 1998. Pyrolysis for raw material recovery from plastic waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 79: 46.

Fuentes, M.J., Font, R., Go mez-Rico, M.F., Martı n-Gullo n, I. 2007. Pyrolysis and combustion of waste lubricant oil from diesel cars: Decomposition and pollutants. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 79: 215–226.

Kim, S.S., Chun, B.H., Kim, S.H. 2000. **Pyrolysis kinetics of waste automobile lubricating oil**. Fuel 79: 1943-1949.

วิชชากร จารุศิริ และจินตนา อุบลวัฒน์. 2550. การแตกตัวด้วยความร้อนของกลีเซอรอลที่เหลือจากกระบวนการเอสเทอริฟิเคชั่นให้เป็นแก๊สโซลีนบนเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3**. สถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย.

ปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล

Improved the Performance of Dye-sensitized Solar Cells by Polyethylene Glycol

กัญญารัตน์ เปล่งสันเทียะ[1] และ สุภาพร ดาวทอง[1*]

Kanyarat Pleengsanthia[1] and Suphaporn Daothong[1*]

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs) เป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่แปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของสารพอลีเอทิลีนไกลคอล 20000 (PEG 20000) ต่อสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ และประสิทธิภาพของ DSSCs จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติม PEG20000 ลงในคอลลอยด์ของ TiO_2 ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก TiO_2:PEG20000 เป็น 0.45:0.05 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม TiO_2 มีปริมาณรูพรุนที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่เติม PEG20000 ซึ่งผลของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSC เพิ่มขึ้นจาก 1.90เปอร์เซ็นต์ เป็น 2.70 เปอร์เซ็นต์และค่าฟิลแฟกเตอร์เท่ากับ 0.44

ABSTRACT

A dye-sensitized solar cell (DSSC) is a photovoltaic device which converts the visible light into electricity. In this work, we focused on the effect of polyethylene glycol 20000 (PEG 20000) on the surface morphology of TiO_2 film and performance of DSSCs. Experimental results show that when PEG 20000 was added to TiO_2 colloid with TiO_2:PEG20000 ratio of 0.45:0.05 weight by weight, the surface morphology of TiO_2 film presented higher porosity compared with that without PEG20000. As a result, the energy conversion efficiency of DSSC was increased from 1.90% to 2.70% and fill factor of 0.44.

Key Words: Dye sensitized solar cell, PEG20000, Photoelectrode

* Corresponding author; e-mail address: **sd.daothong@gmail.com**

[1]สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

[1]Program in Materials Science, Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai 50290

คำนำ

จากวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานและภาวะโลกร้อนในปัจจุบันกลายเป็นปัญหาใหญ่ ที่ต้องการการแก้ไขอย่างเร่งด่วน ประเทศไทยได้ให้ความสำคัญกับปัญหานี้ เช่นเดียวกับนานาประเทศ สาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อนนั้นมีปัจจัยหลักอย่าง หนึ่งมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล (น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน) ดังนั้นแนวทางการลดการใช้พลังงานจากฟอสซิลจะช่วยบรรเทาปัญหานี้ได้ระดับหนึ่ง แต่การพัฒนาภาคเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมรวมถึงภาคการขนส่ง จำเป็นต้องใช้พลังงานอย่างมาก ดังนั้นแนวทางการแก้ปัญหาที่ยั่งยืนคือ การหาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนพลังงานจากแหล่งดังกล่าว พลังงานทางเลือกที่น่าสนใจคือ พลังหมุนเวียน ซึ่งได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ในเขตร้อนการเลือกใช้พลังงานในรูปของแสงจากดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานขนาดใหญ่ที่สุดและเป็นพลังงานสะอาด ไม่ทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ (Muhammad *et al.*, 2015) ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจนำมาเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) ที่ทำจากสารซิลิคอน (Si) ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูง แต่มีข้อเสียคือ มีน้ำหนักมากและมีต้นทุนในการผลิตสูง (Yupeng *et al.,* 2015) จากปัญหาดังกล่าวนักวิจัยต่างได้คิดค้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีน้ำหนักเบา มีต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs) จึงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ ซึ่งได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย จากสถาบันการศึกษาและอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจาก มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูง มีต้นทุนการผลิตต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Arman *et al.*, 2014) โดย DSSCs ประกอบด้วย เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด, โฟโตอิเล็กโทรด และสารละลายอิเล็กโตรไลต์ DSSCs สามารถแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 10% (Grätzel, 2003) การทำงานของ DSSCs จะใช้สีย้อมซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของ DSSCs การใช้สีย้อมเป็นตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อทำให้เกิดการกระตุ้นส่งอิเล็กตรอนไปอยู่ในสถานะเร้า ที่พร้อมจะส่งถ่ายอิเล็กตรอนต่อไปยังสารกึ่งตัวนำกลุ่ม TiO_2 ขนาดระดับนาโนเมตรที่โมเลกุลสีย้อมเกาะอยู่ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงและออกสู่วงจรภายนอก (Load หรือ Storage) ขณะเดียวกันจะเกิดกระบวนการรับอิเล็กตรอนคืนของสีย้อมจากสารละลายอิเล็กโตรไลท์กลุ่ม I^-/I_3^- ที่รับอิเล็กตรอนจากเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด การถ่ายโอนอิเล็กตรอนในชั้นออกไซด์ของขั้วไฟฟ้า มีผลต่อประสิทธิภาพของสีย้อมและปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง (Photocatalyst) ซึ่งพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของชั้นสารกึ่งตัวนำมีค่ามาก ทำให้มีพื้นที่สำหรับยึดเกาะกับสีย้อมมากขึ้นจึงทำให้มีกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ในหลายๆ งานวิจัย ได้ใช้ PEG (Polyethylene glycol) สำหรับเตรียมโฟโตอิเล็กโทรด (Fan *et al.,* 2006; Sing *et al.,* 2014) โดย PEG เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลหลากหลาย การบอกน้ำหนักโมเลกุลจะแสดงเป็นตัวเลขต่อท้ายตามตัวย่อ (PEG) สูตรทั่วไปจะแสดงเป็น $H(OCH_2CH_2)nH$ โดยที่ n คือจำนวนเฉลี่ยของการทำซ้ำกลุ่มออกซิเอทิลีน (Oxyethylene) PEG สามารถละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังละลายในตัวทำละลายอินทรีย์รวมทั้งไฮโดรคาร์บอน เช่น PEG 400 PEG 6,000 และ PEG 20,000 ใช้เป็นสารเติมแต่งพบว่า PEG 400 – 6,000 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของรูพรุนในขณะที่น้ำหนักโมเลกุล PEG จาก 6,000 ถึง 20,000 ทำให้เกิดความพรุนเพิ่มขึ้น (Sunee *et al.,* 2011) มีการรายงานของ Gu *et al.* (2004) ใช้ PEG400, PEG2000 และPEG4000 ผสมในโซล-เจล TiO_2 เพื่อสารที่ทำให้เกิดรูพรุนของฟิล์มบนโฟโตอิเล็กโทรด พบว่าฟิล์มที่เติม PEG2000 ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด 0.214% นอกจากนี้ Tasic *et al.* (2012) เห็นว่า PEG เป็นสารลดแรงตึงผิว

(Surfactant) ที่ไม่มีขั้ว โดยทั่วถูกใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง กำจัดโดยการเผาไหม้ได้ง่าย อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (Glass Transition Temperature) ต่ำ จึงเตรียมฟิล์ม TiO_2 โดยใช้ PEG ที่มีมวลโมเลกุลต่างกัน คือ PEG1000, PEG4000, PEG 6000, PEG 8000, PEG 20000 เป็นสารยึด (Binder) ซึ่งมีผลต่อการเกิดรูพรุน ขนาดอนุภาคและรูปร่าง และการยึดเกาะของฟิล์ม โดยฟิล์มที่เกิดจากการเติม PEG8000 มีความสม่ำเสมอ และไม่มีการแตก ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือ 2.64%

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติม PEG มวลโมเลกุล 20,000 ในปริมาณต่างๆ สำหรับเตรียมฟิล์ม TiO_2 ของโฟโตอิเล็กโทรดเทียบกับไม่เติม PEG และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มและค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าของ DSSCs

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ในการทดลอง

- กระจกนำไฟฟ้า (FTO)
- อนุภาค TiO_2 (21 nm, Aeroxide® P25, Aldrich)
- สีย้อม N719
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สารละลาย H_2PtCl_6 ในตัวทำละลายอะซิโตน
- น้ำปราศจากไอออน

วิธีการ

ขั้นตอนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs) มี 4 ขั้นตอน ดังนี้

- การเตรียมโฟโตอิเล็กโทรด

โฟโตอิเล็กโทรดเป็นการเตรียมฟิล์ม TiO_2 ลงบนกระจก FTO แสดงขั้นตอนตาม Figure 1 ซึ่งใช้อนุภาค TiO_2 ผสมกับ PEG 20,000 ในอัตราส่วนต่างๆ แสดงอัตราส่วนดัง Table 1 จากนั้นนำตัวอย่าง P0, P1 และ P2 ไปเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่สีย้อม N 719 เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

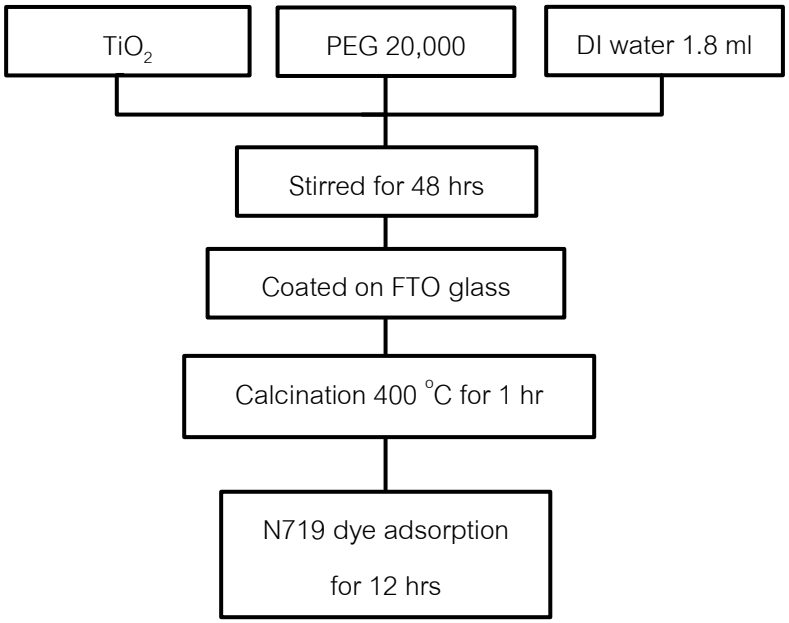


Figure 1 Flow chart of photoelectrode fabrication

Table 1 TiO_2 Colloid compositions

Sample	TiO_2 (g)	PEG 20,000 (g)
P0	0.5	0
P1	0.45	0.05
P2	0.30	0.2

- การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วย I_2 0.05 mol/l, LiI 0.5 mol/l และ 4-Tert-Butylpyridine 0.5 mol/l ในตัวทำละลาย Acetonitrile

- การเตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด

เคาน์เตอร์อิเล็กโทรดเตรียมโดยใช้ H_2PtCl_6 ในตัวทำละลายอะซิโตน ให้ได้ความเข้มขัน 20 mM จากนั้นทำการเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ในพื้นที่ 0.2 × 1.0 cm^2 ด้วยวิธี Doctor blade จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์

ประกอบโฟโตอิเล็กโทรดและเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดเข้าด้วยกันโดยใช้พาราฟิล์มกั้นทั้ง 2 ขั้วไม่ให้สัมผัสกันและเป็นช่องว่าง สำหรับเติมอิเล็กโทรไลต์เข้าไป จากนั้นนำไปวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่อง Solar Simulator ความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับ 100 mW/cm^2 หรือ 1,000 W/m^2 ตาม AM 1.5 (Air Mass 1.5)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนผิวของชิ้นงาน เพื่อแสดงข้อมูลทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน จากการเตรียมฟิล์ม TiO_2 ที่มีส่วนผสมของ PEG 20,000 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันบนกระจก FTO แสดงดัง Figure 2 พบว่า การไม่เติม PEG ของชิ้นงาน P0 พื้นผิวฟิล์มมีการกระจายของรูพรุนบางตำแหน่งและมีรอยแตกเกิดขึ้น ส่วนฟิล์มที่ผสม PEG ของชิ้นงาน P1 และ P2 มีการกระจายตัวของรูพรุนทั่วพื้นผิวของฟิล์ม โดยชิ้นงาน P2 มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค TiO2 บางส่วนและรูพรุนบนพื้นผิวที่มีขนาดใหญ่กว่า P1 ซึ่งการเกิดรูพรุนบนฟิล์ม TiO_2 ที่มีการเติม PEG20000 เป็นผลจากการนำฟิล์มเผาที่อุณหภูมิ 400$^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิดังกล่าว ทำให้ PEG20000 สลายตัวไป จึงปรากฏรูพรุนทั้งพื้นผิวและภายในฟิล์ม TiO_2

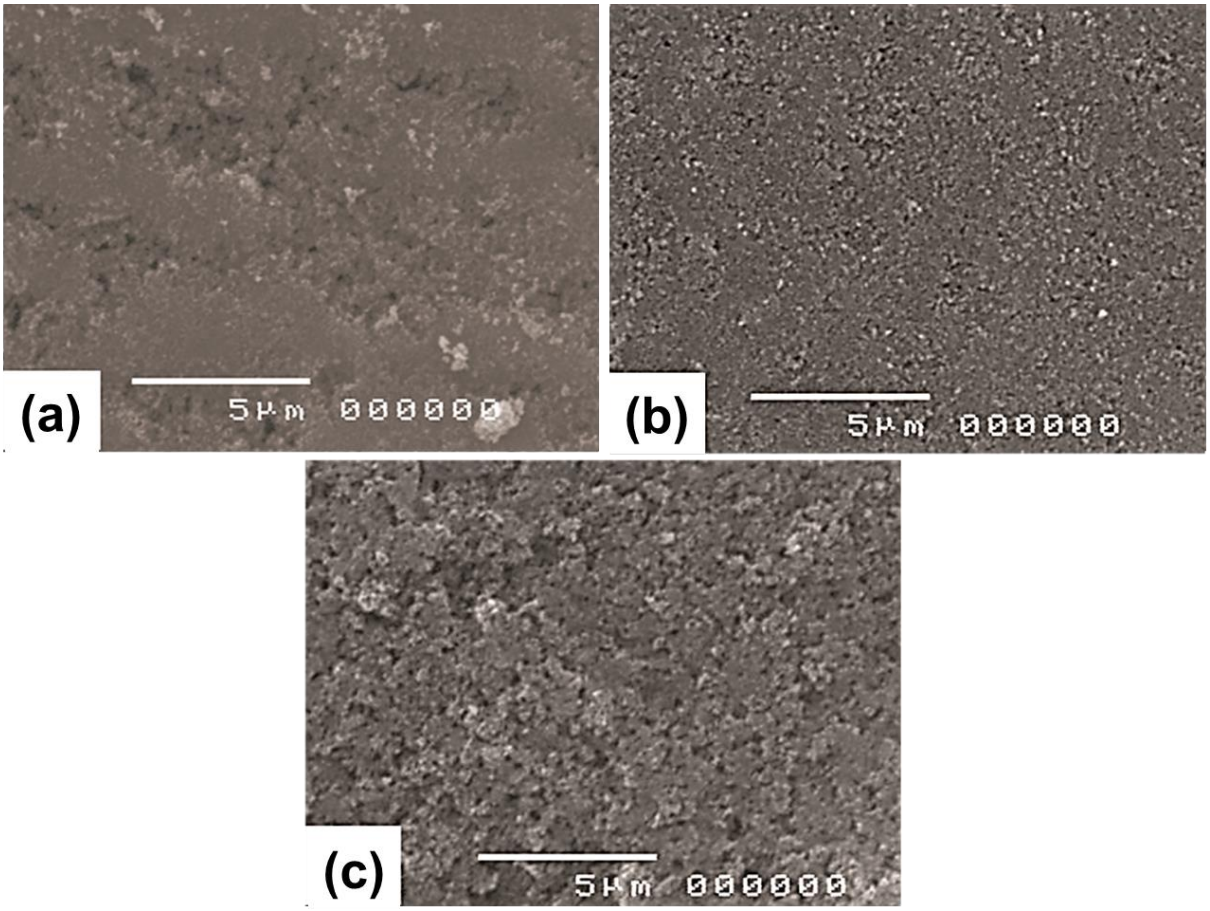


Figure 2 SEM images of (a) Sample P0 (b) Sample P1 and (c) Sample P2

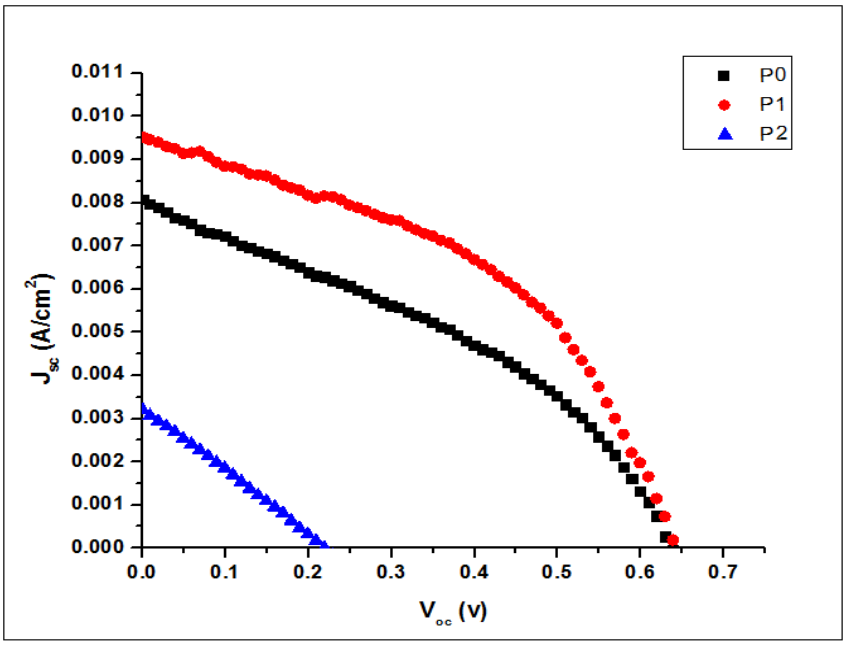


Figure 3 J-V curve for DSSCs with different photo electrodes

ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Efficiency; η) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส กับแรงดันไฟฟ้าพบว่า P1 ได้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรมากกว่าตัวอย่าง P0 และ P2 เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด พบว่าตัวอย่าง P1 ให้ค่าสูงกว่า P0 และ P2 ตามลำดับ โดยข้อมูลจาก Figure 3 นำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ตามสมการ (1) คือ

$$\eta = \frac{FF(V_{oc}\, J_{sc})}{P_{in}} \quad (1)$$

เมื่อ η คือ ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ความสามารถในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

FF คือ ค่าฟิลแฟกเตอร์

V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

J_{sc} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

P_{in} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าแสดงข้อมูลใน Table 2

Table 2 J-V parameter of DSSCs

Sample	J_{sc} (mA cm^{-2})	V_{oc} (V)	FF	η%
P0	8.08	0.63	0.37	1.90
P1	9.52	0.64	0.44	2.70
P2	3.19	0.22	0.26	1.85

จาก Table 2 ผลจากการคำนวณค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เห็นได้ว่าตัวอย่าง P1 จะให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 2.70 % รองลงมาคือตัวอย่าง P0 ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าคือ 1.90 % และตัวอย่าง P2 ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดคือ 1.85 % ตามลำดับ

การเตรียมโฟโตอิเล็กโทรดของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ฟิล์ม TiO_2 จะถูกแช่ลงในสารละลายสีย้อมไวแสงเพื่อให้เกิดการดูดซับ (Adsorption) ของโมเลกุลสีย้อมบนพื้นผิวอนุภาค TiO_2 โดยสารละลายสีย้อมจะเข้าไปตามรูพรุนของฟิล์มแล้วไปยึดเกาะบนอนุภาค TiO_2 สีย้อมไวแสงทำหน้าที่สำคัญในการดูดกลืนพลังงานจากแสงอาทิตย์ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาค TiO_2 ดังนั้นปริมาณโมเลกุลของสีย้อมไวแสงที่ยึดเกาะบนอนุภาค TiO_2 จึงมีความสำคัญอย่างมาก ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งจากผลการทดลอง Table 2 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการเติม PEG 20,000 ตามปริมาณของตัวอย่าง P1 แสดงค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องจากลักษณะของฟิล์ม P1 มีรูพรุนกระจายสม่ำเสมอ โมเลกุลของสีย้อมไวแสงจึงเข้าไปยึดเกาะได้มาก รูพรุนที่ไม่กว้างเกินไปจึงมีส่วนที่เกาะกันของอนุภาค TiO_2 อย่างต่อเนื่อง ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสีย้อมไปยังกระจกนำไฟฟ้าได้ดี ส่วนฟิล์ม P2 ถึงแม้มีรูพรุนมากแต่ขนาดรูพรุนกว้างทำให้อนุภาคของ TiO_2 ไม่เกาะหรือเชื่อต่อกันอย่างต่อเนื่อง จึงทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสีย้อมไปยังกระจกนำไฟฟ้าได้ยากประสิทธิภาพจึงต่ำลง เมื่อพิจารณาการไม่เติม PEG ของตัวอย่าง P0 แม้ฟิล์มจะมีรูพรุนน้อยการยึดเกาะของสีย้อมจึงไม่มากเท่ากับ

P2 แต่การที่อนุภาค TiO_2 อยู่ชิดกัน การส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่า ทำให้ P0 มีค่าประสิทธิภาพสูงกว่า ตัวอย่าง P2

สรุปผลการทดลอง

การใช้ PEG 20,000 ในการเตรียมฟิล์ม TiO_2 เพื่อทำให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างของฟิล์มมากขึ้นจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะบนอนุภาค TiO_2 ได้มากขึ้นตามไปด้วย การเติม PEG 20000 ใน TiO_2 โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก TiO_2 :PEG20000 คือ 0.45:0.05 เป็นอัตราส่วนดีที่สุด ที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการแปลงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้0.45 g สูงถึง 2.70 %

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพนักศึกษาสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปี 2558

เอกสารอ้างอิง

Akoa R. T., E. Piyaisiri, Y. David James, H. Jonathan, C. Vijila, T. Ai Ling, G. Sergey, S. Gomathy Sandhya and L. Chee Ming. 2015. Evaluation of surface energy state distribution and bulk defectconcentration in DSSC photoanodes based on Sn, Fe, and Cu doped TiO_2. **Applied Surface Science** 351: 950–961.

Fan, S. Q., C. J. Li, C. X. Li, G. J. Liu, G. J. Yang and L. Z. Zhang. 2006. Preliminary study of performance of dye-sensitized solar cell of nano-TiO_2 coating deposited by vacuum cold spraying. **Materials Transactions** 47: 1703-1709.

Gu D., Q. Zhang, Q. Wu and Y. Zhu. 2004. Impact of dye-sensitized solar cell anode preparation on performance. **Open Journal of Applied Sciences**, 4: 467-472.

Guo W., L. Xiaodan, O. Huafeng and W. Zhongchang. 2015. PEG-20,000 assisted hydrothermal synthesis of hierarchical ZnO flower structure: growth and gas sensor properties. **Physica E** 73: 163–168.

Grätzel, M. 2003. Dye-sensitized solar cells. **Photochemistry and Photobiology** 4: 145-153

Mehmood U., Ibnelwaleed, A. Hussein, H. Khalil, M.B.Mekki, A. Shakeel and T. Nouar. 2015. Hybrid TiO_2– multiwall carbon nanotube (MWCNTs) photoanodes for efficient dye sensitized solar cells DSSCs) .**Solar Energy Materials & Solar Cells** 140: 174–179.

Qadir M. B., S. Kyung Chul, S. Iftikhar Ali, A. Alvira Ayoub, J. Bum, Y. Sung Chul and J. Sung Hoon.2015. Composite multi-functional over layer: A novel design to improve the photovoltaic performance of DSSC. **Solar Energy Materials & Solar Cells** 140: 141–149

Sedghi A. and H. Nourmohammadi Miankushki. 2014. Effect of multi walled carbon nanotubes as counter electrode on dye sensitized solar cells. **Electrochem** 9: 2029 – 2037.

Sing L. K., C. S. Sipaut, R. F. Mansa and J. Dayou, 2014. Dye sensitized solar cell based on polyethylene lycol/4,4'-diphenylmethane diisocyanate copolymer quasi solid state electrolyte. **Applied Mechanics and Materials** 625: 140-143.

Tasic N., Z. Brankovic, Z. Marinkovic-Stanojevic and G. Brankovic. 2012. Effect of binder molecular weight on morphology of TiO_2 films prepared by tape casting and their photovoltaic performance. **Science of Sintering** 44: 365-372.

Wongchitphimon S., W. Rong, J. Ratana, S. Lei and L. Chun Heng. 2011. Effect of polyethylene glycol (PEG) as an additive on the fabrication of polyvinylidene fluoride-co-hexafluropropylene (PVDF-HFP) asymmetric microporous hollow fiber membranes. **Journal of Membrane Science** 369: 329–338

การศึกษาความสามารถของแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรีในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

A study on plant growth promoting activity of the haloalkaliphilic bacteria isolated from alkaline soil in Kanchanaburi research station

จันทร์แรม รูปขำ[1*], สาวิตร ตระกูลน่าเลื่อมใส[2], ธนภูมิ มณีบุญ[1], ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม[1]และ น้ำผึ้ง อนุกูล[1]

Chanram Roopkham[1*], Savitr Trakulnaleamsai[2], Thanapoom Maneeboon[1], Siriwan Soiklom[1] and Nampeung Anukul[1]

บทคัดย่อ

เชื้อแบคทีเรียจำนวน 33 ไอโซเลทที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรีได้นำมาทำการทดสอบความสามารถในการเป็นแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยการทดสอบความสามารถในการผลิตฮอร์โมนพืชในกลุ่ม Auxin (Indole-3-acetic acid (IAA), Indole-3-butyric acid (IBA), Indole propionic acid (IPA) และ Naphthalene acetic acid (NAA)) พบว่าเชื้อทดสอบทั้งหมดสามารถผลิต IAA โดยเชื้อแบคทีเรียที่ผลิต IAA ได้สูงที่สุด 3 อันดับแรกคือ ไอโซเลท P12-2, P12-12 และ P2-23 โดยผลิตได้ 16.8 µg/ml, 18.9 µg/ml และ 23.12 µg/ml ตามลำดับ ทั้งนี้เชื้อทดสอบทั้งหมดไม่สามารถผลิตฮอร์โมน IBA, IPA, และ NAA ได้เลย สำหรับความสามารถในการผลิตฮอร์โมนกลุ่ม Gibberellin พบว่าเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดสามารถผลิต Gibberellic acid (GA_3) แต่ไม่พบการผลิตฮอร์โมนในกลุ่ม Cytokinin (zeatin และ kinetin) รวมทั้งไม่สามารถละลายฟอสเฟสได้ สำหรับการทดสอบการสร้างแอมโมเนีย พบว่ามีเชื้อจำนวน 31 ไอโซเลท สามารถสร้างแอมโมเนียได้ นอกจากนี้ยังพบว่ามีเชื้อจำนวน 4 ไอโซเลทสามารถสร้างซิเดอร์โรฟอร์ ได้แก่ ไอโซเลท P6-18, P6-8, P7-30 และ 2-17 โดยผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียที่มีความสามารถในการพัฒนาเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ทั้งหมด 7 ไอโซเลท ได้แก่ P2-23, P12-12, P12-2, P6-18, P6-8, P7-30 และ 2-17

ABSTRACT

A total of 33 isolates of bacteria isolated from alkaline soils at Kanchanaburi research station, were evaluated for their plant growth promoting ability. For the production of Auxin hormones (Indole-3-acetic acid (IAA), Indole-3-butyric acid (IBA), Indole propionic acid (IPA) and Naphthalene acetic acid (NAA)), they could be produced by all bacterial isolates. The first three isolates that can produce the highest amount of IAA were P12-2, P12-12 and P2-23 with the production of IAA of 16.8 µg/ml, 18.9 µg/ml and 23.12 µg/ml, respectively. However, IBA, IPA, and NAA could not be produced from those all isolates. For the ability of gibberellin production, all isolates could produce Gibberellic acid (GA_3). None of them were found to produce Cytokinin group (zeatin and kinetin) and solubilizing phosphate. For ammonia production, 31 isolates could be produced. Moreover, siderophore production was detected in only 4 isolates, P6-18, P6-8, P7-30 and 2-17. The result of these study suggested that 7 isolates, P2-23, P12-12, P12-2, P6-18, P6-8, P7-30 and 2-17, were the most effective plant growth promoting bacteria.

Key words: Plant growth promoting bacteria (PGPB), haloalkaliphilic bacteria, phytohormone, auxin, gibberellin

* Corresponding author; e-mail address: rdicrr@ku.ac.th

[1]ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาพัฒนาแห่ง มก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 10900

[1]Scientific Equipment and Research Division, Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University

[2]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[2]Department of Microbiology, Faculty of Science, Kasetsart University

บทนำ

แบคทีเรียเป็นทรัพยากรชีวภาพที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆซึ่งมีความสัมพันธ์กันแบบพึ่งพาอาศัยกัน (symbiosis) และพวกที่อาศัยแบบอิสระในดิน (free living) ถ้าพบอยู่ใกล้บริเวณรากพืชเป็นแบคทีเรียจำพวก plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) แบคทีเรียในกลุ่มนี้จัดเป็นพวก rhizosphere bacteria และแบคทีเรียที่อาศัยบริเวณภายนอกผิวพืชจัดเป็นพวก epiphytic bacteria ช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช เช่นกระตุ้นการสร้างฮอร์โมนพืช การตรึงไนโตรเจน กระตุ้นการละลายฟอสเฟสทำให้นำไปใช้ได้มากขึ้น การสร้างสารปฏิชีวนะ ยับยั้งการสร้างเอธิลีน สร้างซิเดอร์โรฟอร์ และกระตุ้นให้พืชสร้างภูมิต้านทาน (induced systemic resistance, ISR) (Richardson *et al*., 2009; Idris *et al*., 2007; Gutierrez-Manero *et al*., 2001; Whipps 2001) ซึ่งเป็นกลไกที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชโดยเฉพาะฮอร์โมนพืช (phytohormone) การผลิตฮอร์โมนพืชเป็นกลไกสำคัญในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ Auxin หรือ indole-3-acetic acid (IAA), Gibberellin (GA), Cytokinin, Ethylene และ Abscisic acid (ABA) โดยเฉพาะกลุ่ม Auxins ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่สร้างจากเนื้อเยื่อเจริญบริเวณยอดอ่อนและรากอ่อน ตาที่กำลังเจริญ ใบอ่อนและต้นอ่อนที่กำลังเจริญ บทบาทหน้าที่สำคัญเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตในพืช คือกระตุ้นการยืดตัวของเซลล์ การแบ่งเซลล์ และการเปลี่ยนสภาพเซลล์ นอกจากพืชที่สร้าง Auxin ได้แล้วยังพบว่าแบคทีเรียบางชนิดมีความสามารถสร้าง Auxins ได้เช่นกันซึ่งมีอยู่หลายสปีชีส์และหลายสายพันธุ์ ส่วนใหญ่อยู่ในสกุล *Azoarcus, Arthrobacter*, *Azospirillum, Bacillus, Burkholderia, Clostridium, Enterobacter, Gluconacetobacter, Azotobacter, Pseudomonas* และ *Serratia* (Hurek and Reinhold-Hurek, 2003) จากผลการศึกษาความหลากหลายของเชื้อที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรี คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน มีเชื้อที่น่าสนใจศึกษาและนำมาพัฒนาให้เป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตในพืชได้แก่กลุ่ม *Bacillus* ซึ่งเชื้อที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างซึ่งเป็นเชื้อในกลุ่ม Haloalkaliphilic bacteria เพื่อนำไปเป็นเชื้อแบคทีเรียที่ส่งเสริมการเจริญของพืช มีดังนี้ *Bacillus* sp., *B. licheniformis, B. pumilus, B. subtilis, B. firmus*, *B. clausii, B. cereus* และ *B. endophyticus* (สาวิตร และ จันทร์แรม, 2555) โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะคัดเลือกแบคทีเรียกลุ่มนี้ในการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพาะปลูกในพื้นที่ดินเค็มและสภาพเป็นดินด่าง โดยได้ทำการทดสอบความสามารถในการผลิตฮอร์โมน กลุ่ม Auxin (Indole-3-acetic acid, IAA) ทดสอบประสิทธิภาพในการสร้างแอมโมเนีย การละลายฟอสเฟส การสร้างซิเดอร์โรฟอร์ เพื่อคัดเลือกเชื้อที่มีประสิทธิภาพนำมาใช้ส่งเสริมการเจริญของพืช (plant growth promoting bacteria, PGPB) เพื่อพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภาพ ลดการใช้ปุ๋ยเคมี โดยเฉพาะการใช้แบคทีเรียจีนัส *Bacillus* ที่สามารถเจริญได้เร็วและทนทานต่อสภาพแวดล้อม เนื่องจากเป็นแบคทีเรียสร้างสปอร์

อุปกรณ์และวิธีการ

เชื้อแบคทีเรีย

ใช้เชื้อแบคทีเรียจำนวน 33 ไอโซเลท ที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรี คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

การทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตฮอร์โมนพืช

เลี้ยงแบคทีเรียในอาหาร Haloalkaliphile ที่ประกอบด้วย yeast extract 10 g/l, cassamino acids 7.5 g/l, sodium citrate 3 g/l, KCl 2 g/l, $MgSO_4.7H_2O$ 1g/l, $FeSO_4.7H_2O$ 0.05 g/l, $MnSO_4H_2O$ 0.025 g/l, NaCl

5 g/l, Na_2CO_3 5 g/l ปรับ pH สุดท้ายเท่ากับ 7.7 เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นกล้าเชื้อ ย้ายกล้าเชื้อปริมาตร 100 µl ถ่ายลงในอาหาร Haloalkaliphile ที่เติม L- tryptophan ความเข้มข้น 1 g/l บ่มบนเครื่องเขย่าที่ 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที ดูดส่วนใสปริมาตร 1 ml นำมาทดสอบกับสารละลาย Salkowski reagent, (Gordon and Weber, 1951) ปริมาตร 2 ml ตรวจสอบสีชมพูที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงถึงการสร้าง IAA โดยการวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ คำนวณความเข้มข้นของการสร้าง IAA โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของ IAA ที่มีความเข้มข้น 0-10 µg/ml

สำหรับการวิเคราะห์ฮอร์โมนพืชชนิด GA3 ABA NAA IBA IPA IAA Zeatine และ Kinetine (Rachev *et al.* , 1993) ทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC, Shimadzu LC-10A) คอลัมน์ ชนิด octadecyl silane ยี่ห้อ Inertsil ODS-3 (4.6 mm x 250 mm. I.D, 5 µm) อุณหภูมิของคอลัมน์ 30 °C และใช้ cartridge guard C18 (4.0 mm x 10 mm, 5 µm) สารละลายเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ชนิด 0.8 % acetic : acetonitrile อัตราส่วน 55:45 อัตราการไหล 1 ml/min ใช้เครื่องตรวจวัดสารชนิดไดโอดอาเรย์ (Shimadzu, SPD-10Avp) ที่ความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร สำหรับวิเคราะห์ NAA IBA IPA IAA และที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร สำหรับวิเคราะห์ ABA Zeatine และ Kinetine ส่วน GA_3 วัดที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ปริมาตรการฉีดสาร 20 µL และมีระยะเวลาการฉีดแต่ละครั้ง (run time) เท่ากับ 15 นาที

การทดสอบการสร้างแอมโมเนีย

ทดสอบการผลิตแอมโมเนียในอาหาร Peptone water ตามวิธีของ Cappuccino and Sherman (1992) โดยเลี้ยงแบคทีเรียในอาหาร Peptone water ที่มี NaCl 5 g/l บนเครื่องเขย่าที่ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปั่นแยกเซลล์ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที นำส่วนใสมาทำปฏิกิริยาในหลอดทดลอง เติมสารละลาย phenol ปริมาตร 2 ml เขย่าให้เข้ากันและจึงเติมสารละลาย sodium nitroprusside ปริมาตร 2 ml และสารละลาย oxidizing ปริมาตร 5 ml แล้วเขย่าให้เข้ากันอีกครั้ง แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ คำนวณปริมาณแอมโมเนียม-ไนโตรเจน เทียบกับสารละลายมาตรฐาน (NH_3) ที่มีความเข้มข้น 10–100 mg/l (Strickland and Parson, 1972)

การทดสอบความสามารถในการละลายฟอสเฟต

ทดสอบปริมาณการละลายฟอสเฟตตามวิธีของ Husen (2003) โดยการเลี้ยงเชื้อทดสอบลงบนอาหาร Pikovskaya's agar บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 วัน และตรวจสอบลักษณะบริเวณใส (clear zones) ที่เกิดจากการละลายฟอสเฟต

การทดสอบการสร้างซิเดอร์โรฟอร์

เลี้ยงเชื้อแบคทีเรียบนอาหาร chrome azurol S agar medium ตามวิธีของ Schwyn and Neilands (1987) โดยนำเชื้อมาจุด (spot) ลงบน chrome azurol S agar plates บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตรวจสอบสีเหลืองถึงส้ม (yellow to orange colour) ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงผลบวกจากการสร้างซิเดอร์โรฟอร์

การจำแนกชนิดของแบคทีเรีย

จำแนกแบคทีเรียโดยวิเคราะห์ลำดับยีน 16S rRNA โดยใช้ไพรเมอร์ที่จำเพาะกับยีน 16S rRNA (27F AGAGTTTGATCMTGGCTCAG และ 1389R ACGGGCGGTGTGTACAAG) และวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์เปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ NCBI (National Center for Biotechnology Information)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การผลิต IAAและแอมโมเนีย

เมื่อนำเชื้อแบคทีเรียทั้ง 33 ไอโซเลท มาทดสอบความสามารถในการสร้าง IAA ในอาหาร Haloalkaliphile โดยตรวจสอบการสร้าง IAA โดยอาศัยการทำปฏิกิริยากับสารละลาย Salkowski reagent พบว่าเชื้อทดสอบมีการสร้าง IAA ทุกโอโซเลท แต่ปริมาณการสร้างที่ได้แตกต่างกัน (Table 1) โดยปริมาณ IAA สูงเกิน 15 µg/ml มี 3 ไอโซเลทคือ P12-2, P12-12 และ P2-23 ปริมาณ IAA ที่วัดได้ 16.80, 18.19 และ 23.12 µg/ml ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์แล้วพบว่า P12-2 เป็นเชื้อ *B. subtilis* P12-12 เป็นเชื้อ *B. endophyticus* และ P2-23 *Micrococcus aloeverae* จากผลการทดสอบพบว่าเชื้อแบคทีเรียทุกไอโซเลทมีการสร้าง IAA ในช่วงความเข้มข้น 2.71-23.12 µg/ml สำหรับผลการทดสอบการผลิตแอมโมเนียจากแบคทีเรียทั้ง 33 ไอโซเลท พบว่าเชื้อสามารถสร้างแอมโมเนียได้ 31 ไอโซเลท (Table 1) และสร้างแอมโมเนียได้เกิน 470 mg/l มี 3 ไอโซเลทคือ P6-8, P12-14 และ 5-3/2 โดยปริมาณการสร้างแอมโมเนียอยู่ที่ 471.11 mg/l, 478.65 mg/l และ 497.89 mg/l ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA พบว่าเป็นเชื้อ *B. licheniformis* , *B. pumilus* และ *B. safensis* ตามลำดับ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Omar *et al.* (2014) ที่ได้ทำการคัดแยกเชื้อที่ได้จากดินบริเวณรอบรากพืช และจำแนกได้ 12 กลุ่มคือ *Pseudomonas putida*, *P. fluorescens*, *P. areuginosa, Pseudomonas* sp. *Serratia marcences*, *Xanthomonas* sp., *Micrococcucs* sp., *Bacillus cereus*, *B. subtilis*, *B. megaterium*, *B. amyloliquefaciencs*, และ *Staphylococcus* sp. จากการทดสอบการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญของพืชพบว่าเป็นเชื้อที่สามารถสร้าง IAA และซิเดอร์โรฟอร์ และจากงานวิจัยของ Ahmad *et al.* (2006) ที่แยกเชื้อจากดินรอบรากพืชและจากปมรากพืชจำนวน 72 ไอโซเลท โดยจำแนกทางชีวเคมีและทดสอบการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญของพืชพบว่าเชื้อส่วนใหญ่เป็นเชื้อ *Bacillus*, *Azotobacter*, *Pseudomonas* และ *Mesorhizobium* ซึ่งสามารถสร้าง IAA และแอมโมเนียได้

Table 1 Assessment of IAA and Ammonia production

Isolate	16S rDNA sequence analysis	IAA production (µg/ml)	Ammonia production (mg/l)
1-15'	*Bacillus firmus*	3.64	420.18
2-17'	*Bacillus subtilis*	14.01	250.43
2-7'	*Bacillus subtilis*	12.55	385.48
4-1'	*Bacillus pumilus*	2.67	239.12
P10-25	*Bacillus pumilus*	4.89	248.92
P1-1	*Bacillus pumilus*	3.76	347.00
P1-11	*Bacillus cereus*	3.26	317.96
P12-12	*Bacillus endophyticus*	18.19	334.93
P12-14	*Bacillus pumilus*	2.73	478.65
P12-2	*Bacillus subtilis*	16.80	334.18
P1-8	*Bacillus pumilus*	5.89	311.92

Table 1 (cont.)

Isolate	16S rDNA sequence analysis	IAA production (µg/l)	Ammonia production (mg/l)
P2-23	*Micrococcus aloeverae*	23.12	434.14
P3-10	*Bacillus pumilus*	5.10	230.82
P3-14	*Bacillus pumilus*	2.60	419.43
P3-17	*Bacillus pumilus*	3.48	463.56
P3-9	*Bacillus pumilus*	5.78	445.83
P4-20	*Bacillus licheniformis*	4.78	427.73
P6-18	*Bacillus licheniformis*	6.14	260.24
P6-8	*Bacillus licheniformis*	7.60	471.11
P7-14	*Bacillus subtilis*	6.58	451.49
P7-25	*Bacillus clausii*	3.85	385.48
P7-30	*Bacillus licheniformis*	6.12	448.10
P7-25	*Bacillus clausii*	3.85	385.48
P7-30	*Bacillus licheniformis*	6.12	448.10
P5-15	*Bacillus subtilis*	5.26	267.41
P1-15	*Bacillus pumilus*	5.64	239.12
P12-4	*Bacillus subtilis*	8.30	400.19
3-14/1'	*Jeotgalicoccus* sp.	3.33	211.58
P8-20	*Bacillus subtilis*	9.53	nd
1-22'	*Bacillus* sp.	3.92	nd
3-6/2'	*Bacillus safensis*	6.85	253.07
5-3/2'	*Bacillus safensis*	3.80	497.89
P10-18	*Bacillus safensis*	3.78	365.86
P5-5	*Bacillus safensis*	2.71	469.60
P8-23	*Bacillus safensis*	3.35	424.71

nd= not detect

ความสามารถในการละลายฟอสเฟต

การทดสอบการละลายฟอสเฟตพบว่าเชื้อทดสอบไม่สามารถละลายฟอสเฟตได้อาจเป็นเพราะเชื้อกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่ไม่สร้างเอนไซม์หรือกรดอินทรีย์ที่ละลายฟอสเฟต จากงานวิจัยของ Banik (1982) พบว่าเชื้อรามีความสามารถในการย่อยหินฟอสเฟตได้มากกว่าแบคทีเรียประมาณ 3-100 เท่า และเชื้อราที่มีความสามารถในการย่อยหินฟอสเฟตได้แก่ *Aspergillus* และ *Penicillium* ในส่วนของแบคทีเรียได้แก่ *Arthrobacter* sp., และ *Bacillus* sp. โดยฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชในการเพิ่มประสิทธิภาพใน

กระบวนการสังเคราะห์แสง กระบวนการถ่ายทอดทางพันธุกรรม การตรึงไนโตรเจน การออกดอกออกผล การสุกของผล พืชที่ขาดธาตุฟอสฟอรัสจะทำให้การเจริญเติบโตหยุดชะงัก ลำต้นแคระแกร็น ผอม สูง ใบมีขนาดเล็กลง จำนวนใบลดลง (Brady and Weil, 2008; Mehrvarz *et. al*., 2008) จุลินทรีย์กลุ่มที่ละลายฟอสเฟตจะสร้างเอนไซม์หรือกรดอินทรีย์บางชนิดออกมาย่อยหินฟอสเฟตหรือเปลี่ยนรูปนำไปใช้ประโยชน์ได้ จุลินทรีย์กลุ่มนี้เช่น *Bacillus*, *Pseudomonas*, Actinomycetes (Kucey, 1983)

การสร้างซิเดอร์โรฟอร์

เชื้อทดสอบที่ให้ผลบวกในการสร้างซิเดอร์โรฟอร์มีจำนวน 4 ไอโซเลท ได้แก่ P6-8, P6-18, P7-30 และ 2-17 (Figure 1) โดยซิเดอร์โรฟอร์เป็นสารที่แบคทีเรียผลิตขึ้นมาเพื่อจับกับธาตุเหล็กที่อยู่รอบๆรากพืช ซึ่งธาตุเหล็กมีมากบนพื้นโลก แต่อยู่ในรูปของสารประกอบที่ละลายน้ำยาก ซึ่งปริมาณที่ละลายออกมานั้นไม่เพียงพอกับความต้องการของแบคทีเรีย แบคทีเรียที่อาศัยอยู่ภายในดินจึงต้องผลิตสารที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อธาตุเหล็กเพื่อจับธาตุเหล็ก ซึ่งเกิดกลไกทางอ้อมที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตพืชทางอ้อม เมื่อแบคทีเรียที่สร้างซิเดอร์โรฟอร์มาจับธาตุเหล็กแล้ว เชื้อสาเหตุโรคไม่สามารถขยายพันธุ์ได้ ผลจากการขาดธาตุเหล็กจึงป้องกันเชื้อสาเหตุโรคพืชได้ และพืชยังสามารถเจริญได้ เพราะพืชใช้ธาตุเหล็กในการเจริญน้อยกว่าแบคทีเรีย ทั้งนี้จากผลการศึกษาการสร้างซิเดอร์โรฟอร์ของแบคทีเรียที่แยกได้จากปมรากถั่ว 12 ไอโซเลท พบว่าแบคทีเรียมีการสร้างซิเดอร์โรฟอร์ได้ เมื่อเทียบกับ *Rhizobium meliloti* ขนาดการเจริญและการเกิดจุดสีเหลืองส้มจะน้อยกว่าและมีจำนวน 3 ไอโซเลทที่ไม่พบการเจริญบนอาหาร chrome azurol S agar medium ซึ่งเป็นอาหารทดสอบเฉพาะกับการสร้างซิเดอร์โรฟอร์ที่มี HDTMA (Hexadecyltrimethylammonium bromide) เป็นส่วนประกอบและสารนี้จะเป็นพิษกับแบคทีเรียบางไอโซเลทจึงอาจเป็นสาเหตุทำให้แบคทีเรียไม่สามารถเจริญได้ในอาหารนี้ (Verma *et al*., 2012)

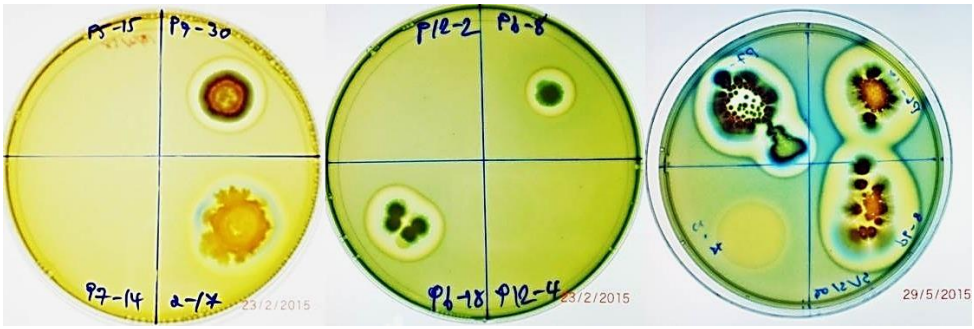


Figure 1 Screening of siderophore-producing bacterial isolates using CAS agar plates

ความสามารถในการผลิตฮอร์โมนพืช

ผลการวิเคราะห์ปริมาณฮอร์โมน GA_3 ABA NAA IBA IPA IAA Zeatine และ Kinetine จากสารละลายที่สกัดได้จากน้ำเลี้ยงเชื้อ ซึ่งเลือกจากเชื้อที่มีการสร้าง IAA สูงจำนวน 2 ไอโซเลท คือ P2-23 และ P12-12 เมื่อวิเคราะห์ด้วย HPLC พบว่าเชื้อมีการสร้างฮอร์โมนชนิด IAA GA3 ส่วน P12-12 สร้างเฉพาะ Kinetine เท่านั้น (Table 2)

Table 2 HPLC analysis of plant hormone production

Isolates	IAA (µg/ml)	IPA (µg/ml)	IBA (µg/ml)	NAA (µg/ml)	Zeatine (µg/ml)	Kinetine (µg/ml)	ABA (µg/ml)	GA3 (µg/ml)
P2-23	39.66	nd	nd	nd	nd	nd	nd	64.60
P12-12	23.64	nd	nd	nd	nd	0.36	nd	89.49

nd = not detect

สรุป

จากเชื้อแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างทั้งหมด 33 ไอโซเลท ที่ทดสอบการเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญของพืชในการสร้างฮอร์โมนพืช พบว่ามีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นที่เชื้อที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่เชื้อ P12-2, P12-12 และ P2-23 ซึ่งสามารถสร้าง IAA ได้สูงอยู่ที่16.80 µg/ml, 18.19 µg/ml และ 23.12 µg/ml ตามลำดับ ส่วนการทดสอบการสร้างแอมโมเนียเชื้อที่สร้างแอมโมเนียได้เกิน 470 mg/l มีจำนวน 3 ไอโซเลทคือ P6-8, P12-14 และ 5-3/2 โดยปริมาณการสร้างแอมโมเนียอยู่ที่ 471.11 mg/l, 478.65 mg/l และ 497.89 mg/l ตามลำดับ การทดสอบการละลายฟอสเฟตพบว่าเชื้อไม่สามารถละลายฟอสเฟตได้อาจเป็นเพราะจุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่ไม่สร้างเอนไซม์หรือกรดอินทรีย์ที่ออกมาละลายฟอสเฟต การทดสอบการสร้างซิเดอร์ โรฟอร์โดยเลี้ยงบนอาหาร chrome azurol S agar medium พบว่าเชื้อทดสอบที่ให้ผลบวกในการสร้างซิเดอร์โรฟอร์มีเพียง 4 ไอโซเลท ได้แก่ P6-8, P6-18, P7-30 และ 2-17 ส่วนเชื้ออื่นไม่พบการสร้างซึ่งเป็นผลจากในอาหารทดลอบมี Hexadecyltrimethylammonium bromide เป็นส่วนประกอบและสารนี้จะเป็นพิษกับแบคทีเรียบางไอโซเลทจึงเป็นสาเหตุทำให้แบคทีเรียไม่สามารถเจริญได้ ผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติเด่นในการเจริญในสภาวะด่างและมีเกลือที่สามารถพัฒนาเป็นเชื้อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ทั้งหมด 7 ไอโซเลท ได้แก่ P2-23, P12-12, P12-2, P6-18, P6-8, P7-30 และ 2-17 ซึ่งต้องมีการศึกษาการประยุกต์ใช้กับพืชต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

สาวิตร ตระกูลน่าเลื่อมใส และ จันทร์แรม รูปขำ. 2555. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย **ความหลากหลายของแบคทีเรียกลุ่มที่ชอบเกลือและพีเอชเป็นด่างที่แยกได้จากดินด่างบริเวณสถานีวิจัยกาญจนบุรีและความสามารถในการย่อยสารประกอบฟีนอล**. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Ahmad, F, I. Ahma amd M.S. Khan. 2006. Screening of free-living rhizospheric bacteria for their multiple plant growth promoting activities. **Microbiol. Res**. 163 - 2 :173–181

Banik, S. and B.K. Dey. 1983. Alluvial soil microorganisms capable of utilizing insoluble aluminium phosphate as a sole source of phosphorus. **Zbl. Microbiol**. 138, 437-442.

Brady, N. C. and R. R. Weil. 2008. **The nature and properties of soils**. 14th ed. Pearson Education, Inc, Upper Saddle River, New Jersey. 960 p.

Cappuccino, J.C. and N. Sherman. 1992. **Microbiology: A laboratory manual.** 3rd ed. Benjamin/ cummings Pub. Co., New York.

Gordon, S. A. and R. P. Weber. 1951. Colorimetric estimation of indole acetic acid. **Plant Physiol.** 26:192-195

Gutierrez-Manero F.J, B. Ramos, A. Probanza, J. Mehouachi and M.Talon. 2001. The plant growth promoting rhizobacteria *Bacillus pumilus* and *Bacillus licheniformis* produce high amounts of physiologically active gibberelins. **Physiol. Plant.** 111:206–211

Hurek, T. and B. Reinhold-Hurek. 2003. *Azoarcus* sp. strain BH72 as a model for nitrogen-fixing grass endophytes. **J. Biotechnol.** 106: 169–178.

Husen, E. 2003. Sceening of soil bacteria for plant growth promotion activities in vitro. **Indonesian. J. Agric. Sci.** 4 (1): 27-31.

Idris E.E.S, D.J. Iglesias, M. Talon and R. Borriss. 2007. Tryptophan-dependent production of Indole-3-Acetic Acid (IAA) affects level of plant growth promotion by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. **Mol. Plant. Microbe. Interact.** 20:619–626

Kucey, R.M.N.1983. Phosphate-solobilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils. **Can. J. Soil Sci.** 63: 671-678.

Mehrvarz, S., Chaichi, M.R. and Alikhani, H.A. 2008. Effects of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus chemical fertilezer on yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare* L.). **Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.** 3 (6): 822 – 828.

Neiland, J. B. 1995. Siderophores: structure and function of microbial iron transport compounds. **J. Bio.Chem**. 270(45): 26723-26726.

Omar A. Almaghrabi, T. Abdelmoneim, S. Hassan, M. Albishri and Tarek A. A. Moussa. 2014. Enhancement of Maize growth using some plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) under laboratory conditions. **Life. Sci. J.** 11(11):764-772

Rachev, R. C. H., Rusava. R. P., Bojkov, S. V. and Gancheva, V.K., 1993. Isolation of gibberellic acid produced by *Fusarium moniliforme*. **J. Natural. Products**. 56, 1168-1170.

Richardson, A.E., J.M. Barea, A.M. McNeill and C. Prigent-Combaret. 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. **Plant. Soil**. 321:305–339

Schwyn, B. and J.B. Neilands. 1987. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. **Anal. Biochem.** 160: 47–56

Strickland, J.D.H. and T.R. Parson. 1972. **A Practical Handbook of Sea-water Analysis**. 2nd ed. Fisheries Research Board of Canada Bulletin No. 167, Ottawa.

Verma V., K. Joshi and B. Mazumdar. 2012. Study of siderophore formation in nodule-forming bacterial species. **Res. J. Chem. Sci.** 2: 26-29.

Whipps J.M. 2001. Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. **J. Exp. Bot.** 52:487–512

Surface Analysis of Polyethylene Film Modified via Ceric ion-induced Grafting of Acrylamide

Thirawan Nipithakul[1*] and Kulsinee Sintasanai[2]

ABSTRACT

The acrylamide-grafted polyethylene film was prepared via 2-stage method. The polyethylene (PE) surface was initially hydroxylated by two different methods: thermal decomposition of potassium persulfate and chromic acid-sodium borohydride reaction. Subsequently, the hydroxylated film was grafted with acrylamide (AAm) monomer by ceric ion technique. Characterizations of modified surfaces were conducted through Fourier transforms infrared spectroscopy in the attenuated total reflectance mode (ATR-FTIR), contact angle measurement, optical microscopy (OM) and atomic force microscopy (AFM). Dye staining with methylene blue (MB) was used to examine the presence of polyacrylamide onto PE surfaces. The mechanical properties of the grafted film were also investigated. Results indicated that the surface properties were affected by the method of hydroxylation. The degree of grafting increased as a function of reaction time. The ATR-FTIR spectra and OM images confirmed the surface modification of PE film. Morphology analysis revealed the non-homogeneous surface which was generated by the AAm grafting. No significant differences were found in the mechanical properties of surface grafted PE compared to pristine PE.

Key words: polyethylene, acrylamide, hydroxylation, ceric ion-induced grafting

* Corresponding author; e-mail address: thirawan@tu.ac.th

[1]College of Interdisciplinary Studies, Thammasat University (Lampang), Lampang 52190

[2]Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok 10400

INTRODUCTION

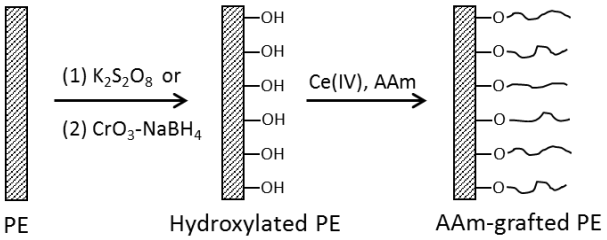
Polyethylene surfaces are inert and nonpolar as a result of their long aliphatic chains of hydrocarbon consisting of only carbon and hydrogen. There is much interest in modifying the surface of PE to make it more hydrophilic. Example benefits of such modification include having wettable surfaces for dye adsorption (Bag *et al*., 1999), better adhesion (Amornsakchai and Doaddara, 2008), enzyme immobilization and biocompatibility (Siddiqa *et al*., 2015).

Bamford and Al-Lamee (1994) purposed a simple and inexpensive treatment for surface functionalization and grafting which could be carried out under mild aqueous conditions. It is two-stage process, consisting of hydroxylation to produce hydroxyl groups on surface by using a peroxy compound and then grafting of vinyl monomer on the hydroxylated polymer by the conventional ceric ion technique. The advantage of this technique over other methods is to possibly use in both hydrophilic and hydrophobic vinyl monomer systems.

Hydroxylation is the stage in which the polymer is oxidized by an oxidizing agent in an aqueous media to generate oxygen-center radicals that are finally become to hydroxyl groups on polymer surface. Usually, hydroxylated polymer was prepared by two well-known methods, i.e., thermal decomposition of potassium persulfate ($K_2S_2O_8$) (Bamford and Al-Lamee, 1994; Amornsakchai and Doaddara, 2008) and oxidation-reduction treatment (Batich and Yahiaoui, 1987). The oxidation-reduction method consists of two-stage process, that is, the first is oxidation of polymers by chromic acid to yield carbonyl groups on surface and the second is reduction with diborane to form a hydroxyl-rich surface.

Graft polymerization of vinyl monomers onto hydroxyl-bearing substrates by Ce (IV) ion-induced initiation is an effective synthetic method. Many researchers have used this technique for the grafting of acrylamide onto polyethylene (Kubota *et al*., 2001 Amornsakchai and Doaddara, 2008; Siddiqa *et al*., 2015).

In the present study, polyethylene film surface was modified by grafting with acrylamide using the 2-stage method: hydroxylation and grafting. This method was chosen because of its simplicity and it does not require special equipment. The changes on the film surface can be sketched in Scheme 1. The paper describes the preparation of grafted PE film and the characterization of the surface after chemical modification.



Scheme 1 Chemical changes on the film surface after each step of modification.

MATERIALS AND METHODS

1. Hydroxylation of PE film

PE film was washed with acetone before use to remove any additives adsorbed on the surface and dried at room temperature. The polymer surface was hydroxylated by two different methods: thermal decomposition of potassium persulfate and chromic acid-sodium borohydride reaction.

- In the first method, sample was soaked in aqueous solution of 10% w/v $K_2S_2O_8$ (KPS, Fluka) at 80°C for 3 h. The sample was then removed and washed several times with water and dried at room temperature.

- The reaction of CrO_3-$NaBH_4$ was carried out by immersing the film in oxidizing agent at 72°C for 30 min and thereafter 65% HNO_3 solution at 50°C for 15 min. The oxidizing agent is a mixture of chromium trioxide (Carlo Erba), water and concentrated H_2SO_4 in a 3:4:3 ratio by weight. Subsequently, the samples were thoroughly washed with distilled water at 50°C, rinsed with acetone and then dried at room temperature. In order to generate the alcohol functionality on the surface, the oxidized PE was immersed in 4% w/v of $NaBH_4$ (Fluka) in 0.1 M NaOH and allowed to react at 50°C for 2 h. After that, the samples were then immersed in 1 M HCl for 10 min and rinsed with distilled water, 1 M HCl, distilled water (3 times) and methanol. Eventually, the samples were dried at room temperature.

2. Surface grafting of acrylamide onto PE film

After hydroxylation, samples were submitted to grafting reaction. The solution consists of $3x10^{-3}$ M ceric ammonium nitrate $[(NH_4)_2Ce(NO_3)_6]$ (Fluka), 7% w/v of acrylamide (AAm) monomer (Fluka) in 0.05 M HNO_3. Nitrogen gas was slowly bubbled through the reaction vessel for 1 min. The reaction mixture was stirred for a definite period of time at 50°C. The grafting time was varied from 1 to 7 h. Then, the grafted PE film was washed thoroughly with hot water and dried at room temperature.

3. Surface characterization of functionalized PE film

The extent of grafting was estimated by direct weighing. The degree of grafting was calculated as follows:

$$\% \, Grafting = \frac{(W_g - W_i) \times 100}{W_i}$$

where W_i and W_g are the weights of the sample before and after grafting reaction

For qualitative analysis, polyacrylamide present on the surface of different samples was stained with methylene blue (MB). The NR films either grafted or ungrafted were immersed in MB solution for 24h. The dyed films were then cleaned and flushed with nitrogen gas. The cross-section morphology of sample after treatment with MB was examined using an optical microscope.

Changes in chemical structure of PE surface due to hydroxylation, grafting with acrylamide were followed by Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR). The

measurements were performed on a Brüker Equinox 55 Infrared Fourier Transform Spectrometer with 16 scans at a resolution of 4 cm^{-1} over range of 4000 to 600 cm^{-1}.

Static distilled water contact angle was measured on the film with a Krüss Goniometer using the sessile drop technique. Each contact angle was determined from an average of 10 measurements.

Morphological features of the polymer films were characterized by means of Atomic Force Microscopy (AFM). The experiments were performed in tapping mode with a NanoScope IIIa.

4. Mechanical property analysis

The tensile strength of sample films was measured using Instron 4301 tensile testing machine. A crosshead speed of 50 mm/min with load cell of 100 N was employed. For each sample, three measurements were performed and the average data were recorded.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Optimum method for preparation of hydroxylated film

After hydroxylation, the absorption peak assigning to carbonyl group stretching was found at 1712 cm^{-1} in the spectra of hydroxylated PE samples (Figures 1b and 1c) whereas the characteristic of hydroxyl group was not detected. This stage has been reported to generate a relatively small number of hydroxyl groups and different types of carbonyl functional groups such as carboxylic acid, ketone or aldehyde (Bamford and Al-Lamee, 1994; Bag *et al*., 1999; Kubota *et al*., 2001). It was probably that the amount hydroxyl groups occurred was not high enough to be determined by ATR-FTIR technique

In order to confirm the formation of hydroxyl group on the surface of the hydroxylated PE film, the sample was reacted with trifluoroacetic anhydride (TFA), by which a hydroxyl group (-OH) could be converted to a trifluoroester group (-O-CO-CF_3) (Price *et al*., 1996; Kubota *et al*., 2001). The absorption band due to the trifluoroester group appeared at 1782 cm^{-1} in the treated film (Figure 1d). It was confirmed, thus, hydroxyl groups are formed on the surface of hydroxylated sample.

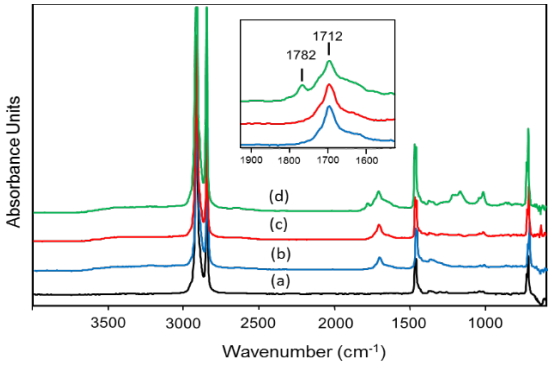


Figure 1 ATR-FTIR spectra of (a) PE (b) KPS_PE (c) Chromic_PE (d) hydroxylated PE treated with TFAA.

Table 1 Water contact angles for various samples.

Sample	Contact angle (± 1°)	
	Within 24 h	After 3 months
Untreated PE	82	82
KPS_PE	74	74
Chromic_PE	55	72

From Table 1, the untreated film showed the highest contact angle of 82°. After hydroxylation with both techniques, the contact angle of PE was significantly decreased. In the case of KPS reaction, the change of contact angle was reported to be the result of the formation of polar hydroxyl groups on hydroxylated PE surface (Bamford and Al-Lamee, 1994; Amornsakchai and Doaddara, 2008). As oxidation by chromic acid, such a behavior was believed to be due to the presence of both hydroxyl and carboxylic acid groups generated on oxidized PE sample (Bag *et al*., 1999).

Compared to PE hydroxylated with KPS (KPS_PE), PE hydroxylated with CrO_3-$NaBH_4$ (Chromic_PE) showed lower contact angle measured within 24 h after treatment. This observation correlated with the presence of carboxylic groups on hydroxylated PE surface after $NaBH_4$ reduction. These functional groups, having higher polarity than that of hydroxyl groups, led to the reduction of contact angle. Furthermore, the lower contact angle of Chromic_PE may be ascribed to the roughness owing to chromic acid etching (Bag *et al*., 1999).

However, it was found that Chromic_PE sample presented an increase in contact angle after storage at an ambient temperature in air atmosphere for 3 months whereas KPS_PE maintained constantly the contact angle. This suggested that the hydrophilicity of Chromic_PE changed with the time. It might be caused by high polarity of functional groups on the PE surface after treatment with CrO_3-$NaBH_4$. These functional groups tended to restructure or reorientation to diminish the surface energy. Such a migration of the polar fraction towards the bulk of the polymer led to an increase of contact angle. In addition, Bag *et al*. (1999) reported that etching of chromic acid resulted in the chain degradation. This contributed to the mobility of polymer chains, leading to the surface reorganization during storage.

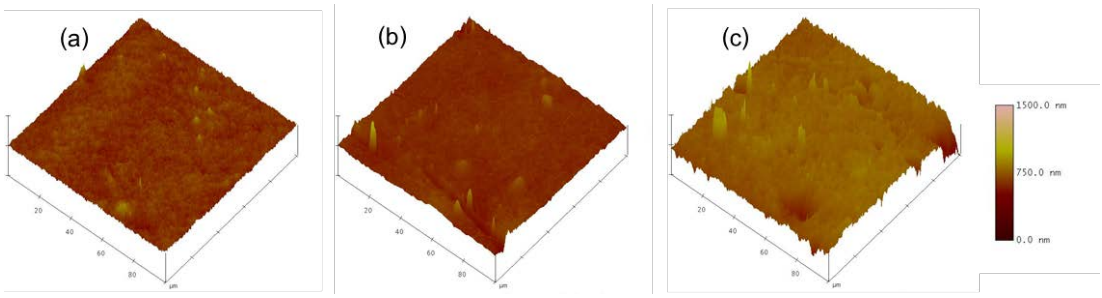


Figure 2 AFM micrographs of (a) PE (b) KPS_PE (c) Chromic_PE.

To determine the effect of two different hydroxylation methods on the surface morphology of modified PE, the sample was characterized under atomic force microscopy (AFM). It can be seen that no morphology changed on the sample surface due to KPS hydroxylation (Figure 2b), whereas pitting and surface roughening was observed after CrO_3-$NaBH_4$ treatment (Figure 2c). This result was in agreement with those of other workers (Schönherr and Vancso, 1998; Bag *et al*., 1999), which the roughness was attributed to the corrosion of PE surface by chromic acid etching.

Comparison to CrO_3-$NaBH_4$ treatment, thermal decomposition of KPS demonstrated more simple procedure to generate hydroxyl groups onto PE surface. In addition, it possesses the stability of hydrophilic properties and did not bring about the damage to the bulk property of PE film. Therefore, in the further study the persulfate decomposition was undoubtedly selected to produce hydroxylated PE film in which was subsequently grafted with monomer.

2. Ceric (IV) ion-induced grafting of acrylamide

Dye adsorption test is a reliable and simple method to obtain information on the presence of acrylamide in sample, especially in the first stages of research. For a copolymer with a nonpolar-polymer substrate and polar-polymer grafted chains, a certain dye can be selected to color only the grafted chains, with the substrate unchanged (Hou *et al.*, 2007). After sample immersion in MB, the grafted film turned dark blue (Figure 3). Evidently, the darkness of the color is related to the grafting density. The bigger the grafting density is, the darker the shade is. This behavior cannot be observed in untreated PE and hydroxylated PE (not shown here).

Slicing the colored copolymer and observing the obtained cross-section by optical microscopy could give information on the distribution of grafted chains in the substrate. It can be seen clearly that only a thin outer surface region of the cross-section is stained with methylene blue (Figure 4). This result indicated that the AAm-grafted polymer (PE-*g*-AAm) was chemically bonded to the surface of PE film.

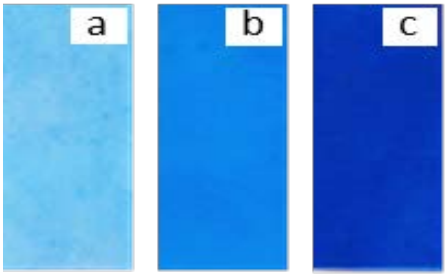


Figure 3 Photographs of stained PE-*g*-AAm with various times: (a) 0.5 h (b) 1 h and (c) 7 h.

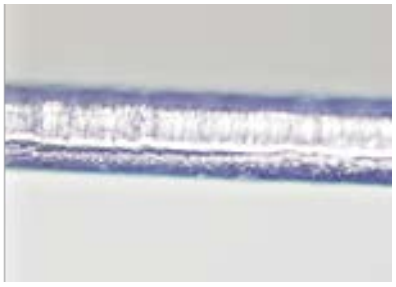


Figure 4 Optical micrograph of the cross-section of stained AAm-grafted PE (7 h).

Chemical functional groups on a surface region could be detected and identified by ATR-FTIR. Compared to original PE, AAm-grafted film demonstrated two bands centered at 3200 and 3342 cm^{-1} and two peaks at around 1618 and 1656 cm^{-1} which corresponded to NH_2 stretching (amide II) and C=O stretching (amide I) of amide group , respectively (Figure 5). This result manifested the successful introduction of AAm monomer onto PE surface by 2-stage process.

The %grafting increased as a function of grafting time and did not rise much higher after 3 h (Figure 6). This pattern is generally observed in surface grafting (Kubota *et al.*, 2001). With higher grafting time, more amount of AAm grafting occurred on PE surface. The grafting yield was saturated at 3 h.

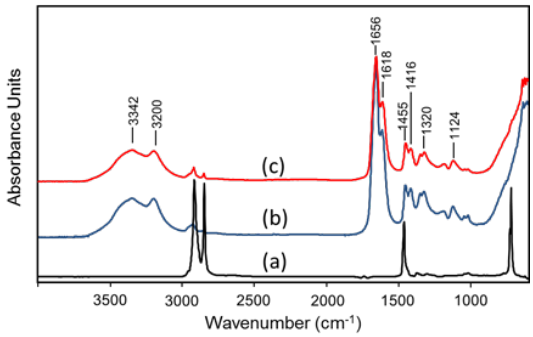


Figure 5 ATR-FTIR spectra of (a) PE (b) polyacrylamide and (c) PE-*g*-AAM (7 h).

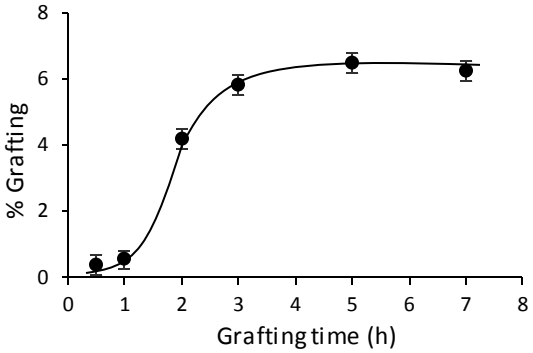


Figure 6 Relationship of reaction time with %grafting of PE-*g*-AAM.

AFM was chosen for morphological characterization of the surface of modified films. Figure 7 represents AFM surface images of PE-*g*-AAm at different time. The surface of the modified film exhibited significant change and the island like structure formation was observed with different grafting time. The increase in island like structure was assumed to increase the number of attachment of grafted chains on the main polymer backbone, as reported by Siddiqa *et al*. (2015). This observation indicates that the surface morphology is significantly changed via grafting.

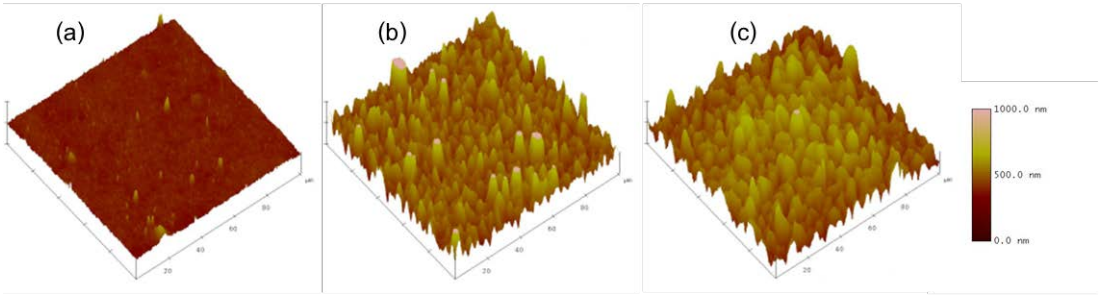


Figure 7 AFM micrographs of PE-*g*-AAm with various times: (a) 0.5 h (b) 3 h and (c) 7 h.

Figure 8 shows that there is no significant change in tensile strength and the elongation at break of functionalized PE compared to original PE. This result agreed with Siddiqa *et al*. (2015). Grafting of acrylamide using the 2-stage method is a simple and inexpensive treatment for surface functionalization in which only the surface is modified without changing the properties of the bulk.

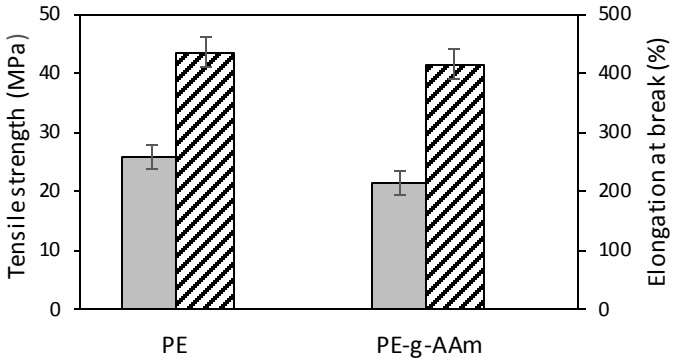


Figure 8 Effect of AAm grafting on the tensile strength and elongation at break of PE film.

CONCLUSION

Acrylamide was successfully grafted onto the surface of polyethylene by chemical pretreatment and subsequent ceric (IV) ion-induced graft polymerization. The modification process changes in a thin surface layer without affecting the bulk properties of the film. With higher grafting time, more amount of AAm grafting occurred on PE surface. The surface morphology of pristine film was transformed into a non-homogeneous one after the grafting. The existence of amide groups on material surfaces provides effective reaction sites for sequential modification to fulfill the requirements of various applications.

REFERENCES

Amornsakchai, T. and O. Doaddara. 2008. Grafting of acrylamide and acrylic acid onto polyethylene fiber for improved adhesion to epoxy resin. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 27: 671-682.

Bag, D.S., V.P. Kumar and S. Maiti. 1999. Chemical modification of LDPE film. **Journal of Applied Polymer Science.** 71: 1041-1048.

Bamford, C.H. and K.G. Al-Lamee. 1994. Studies in polymer surface functionalization and grafting for biomedical and other applications. **Polymer**. 35: 2844-2852.

Batich, C. and A. Yahiaoui. 1987. Surface modification I. Graft polymerization of acrylamide onto low-density polyethylene by Ce^{4+}-induced initiation. **Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry.** 25: 3479-3488.

Hou, Z., S. Chen and K. Sheng. 2007. Distribution of acrylic acid grafted chains introduced into polyethylene film by simultaneous radiation grafting with water and ethanol as solvents. **Journal of Applied Polymer Science.** 103: 1570-1577.

Kubota, H., Y. Hariya, S. Kuroda and T. Kondo. 2001. Effect of photoirradiation on potassium persulfate-surface oxidation of low-density polyethylene film. **Polymer Degradation and Stability**. 72: 223-227.

Price, G.J., A.A. Clifton and F. Keen. 1996. Ultrasonically enhanced persulfate oxidation of polyethylene surfaces. **Polymer.** 37: 5825-5829.

Schönherr, H. and G.J. Vancso. 1998. Surface properties of oxidized LDPE by scanning force microscopy with chemically modified probes. **Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics.** 36: 2483-2492.

Siddiqa, A.J., K. Chaudhury and B. Adhikari. 2015. Hydrophilic low density polyethylene (LDPE) films for cell adhesion and proliferation. **Research & Reviews: Journal of Medicinal & Organic Chemistry.** 1: 43-54.

การเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์ส่วน open reading frame ของยีนไวเทลโลเจนิน จากเพลี้ยอ่อนมะเขือ (*Aphis gossypii* Glov) และเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาว (*Aphis craccivora* Koch)

Comparative open reading frame (ORF) sequences of the *vitellogenin* gene between *Aphis gossypii* Glov and *Aphis craccivora* Koch

ศุภวรรณ เรืองพุฒ[1*] และเลิศลักษณ์ เงินศิริ[2]

Supawan Ruangput[1*] and Lertluk Ngernsiri[2]

บทคัดย่อ

โปรตีนไวเทลโลเจนินเป็นโปรตีนตั้งต้นของโปรตีนโยลค์ (yolk protein) ที่เป็นสารอาหารสำคัญต่อการเจริญเติบโตของตัวอ่อนในสัตว์ที่ออกลูกเป็นไข่ (oviparous animals) งานวิจัยนี้ได้ทำการโคลนและศึกษาลำดับนิวคลีโอไทด์ส่วน open reading frame (ORF) ของยีนไวเทลโลเจนิน (*vitellogenin, Vg*) ในเพลี้ยอ่อนมะเขือ (*Aphis gossypii* Glov) และเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาว (*Aphis craccivora* Koch) พบว่า *Vg*ORF ของเพลี้ยทั้งสองชนิด ประกอบด้วยนิวคลีโอไทด์ 2,826 คู่เบส เมื่อแปลรหัสเป็นโปรตีน Vg ที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน 941 เรซิดิวส์ และมี กรดอะมิโน 19 ตัวเป็น signal peptide เมื่อนำลำดับนิวคลีโอไทด์ของ *Vg*ORF และ กรดอะมิโนของโปรตีน Vg ของเพลี้ยอ่อนทั้งสองชนิด มาเปรียบเทียบกัน พบว่า ทั้งนิวคลีโอไทด์และกรดอะมิโน มีเปอร์เซนต์ความเหมือน (identity) 97% ส่วนค่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีน Vg ของเพลี้ยอ่อนมะเขือ (AgVg) เท่ากับ 108.65 กิโลดาลตัน มีค่า pI เท่ากับ 6.44 ในขณะที่ค่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีน Vg ในเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาว (AcVg) เท่ากับ 108.66 กิโลดาลตัน มีค่า pI เท่ากับ 6.52 โดยทั้งโปรตีน AgVg และ AcVg มี โดเมนที่สำคัญ คือ Lipoprotein N-terminal Domain (LPD_N) อยู่ในตำแหน่งกรดอะมิโนที่ 35-573

ABSTRACT

Vitellogenin is a yolk protein precursor that is important nutrient for embryonic development of oviparous animals. Here, we cloned and sequenced open reading frames (ORFs) of *vitellogenin* (*Vg*) gene from *A. gossypii* Glov and *A. craccivora* Koch. The length of *Vg* ORFs *of A. gossypii* and *A. craccivora* composed of 2,826 bp encoding 941 amino acid residues with 19 amino acid signal peptides. The percent identities of the nucleotide and amino acid sequences of AgVg and AcVg were both 97%. The predicted molecular weight and pI of AgVg were 108.65 kDa and 6.44 respectively, while those of AcVg Koch were 108.65 kDa and 6.52 respectively. The two Vg proteins contained a domain, Lipoprotein N-terminal Domain (LPD_N) at 35-573 amino acid positions.

Key Word :cotton aphid , *Aphis gossypii* Glov , *Aphis craccivora* Koch , *vitellogenin* gene

* Corresponding author; e-mail address : 5516000076@ku.ac.th

[1]โครงการสหวิทยาการ สาขาพันธุวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ10900

[1]Interdisciplinary Graduate Program in Genetic Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

คำนำ

เพลี้ยอ่อนเป็นแมลงปากดูดขนาดเล็ก ที่ทำลายพืชโดยการดูดกินน้ำเลี้ยงตามยอดอ่อน ใบอ่อนและดอก ถ้าเกิดการระบาดในขณะที่ต้นพืชยังเล็ก จะส่งผลให้ลำต้นแคระแกรน ใบอ่อนยอดอ่อนหงิกงอ และยังเป็นพาหะนำโรคไวรัสที่สำคัญหลายชนิด ตัวอ่อนสืบพันธุ์ได้โดยไม่ต้องผ่านการผสมพันธุ์ ตัวอ่อนที่ฟักออกมาจะมีขนาดเล็ก สีเหลืองอ่อน นัยน์ตาดำมีขา 3 คู่ หนวดสั้น รูปร่างลักษณะคล้ายตัวเต็มวัย ตัวอ่อนมีการลอกคราบเพื่อการเจริญเติบโต สีของลำตัวจะเข้มขึ้นเรื่อยๆ ตัวเต็มวัย 1 ตัวสามารถออกลูกได้ถึง 6-11 ตัว/วัน ในระยะเป็นตัวอ่อนนั้นจะมีการลอกคราบ 4 ครั้ง ตัวอ่อนมีอายุประมาณ 5-6 วันหลังจากนั้นจะพัฒนาเป็นตัวเต็มวัย

ไวเทลโลเจนิน (vitellogenin, Vg) เป็นสารตั้งต้นของโปรตีนไวเทลลิน (vitellin) (Paul*et* al., 1984) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของโปรตีนโยล์ค (yolk protein) ที่ประกอบไปด้วยโปรตีน 2 ชนิด คือ ลิโพไวเทลลิน (lipovitellin) และฟอสไวทิน (phosvitin) (Muhammad and M. Takeda. 2008) โดยจะเป็นแหล่งอาหารและพลังงานสำหรับตัวอ่อน (embryo) ในแมลง ไวเทลโลเจนินถูกสังเคราะห์ขึ้นที่เซลล์ไขมัน (fat body) โดยจะผลิตออกมาเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่เรียกว่า provitellogenin (Austin, 2010) ซึ่งต่อมาจะเข้าสู่กระบวนการต่างๆ เช่น Proteolytically cleavage, Glycosylation, Phosphorylation และ Lipidation จากนั้นจึงผ่านเข้าสู่กระแสเลือด (Cheon*et al*., 2003) แล้วส่งต่อเข้าไปยังโอโอไซท์โดยอาศัยกระบวนการ receptor-mediated endocytosis (Opresko and Wiley 1987a,b) การทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาไวเทลโลเจนินซึ่งเป็นโปรตีนที่มีความสำคัญในการเจริญเติบโตของตัวอ่อน ที่เป็นแหล่งอาหารและพลังงานสำหรับตัวอ่อน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการหาวิธีการควบคุมและกำจัดเพลี้ยอ่อนซึ่งเป็นศัตรูพืชที่สำคัญต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่างเพลี้ยอ่อนมะเขือ (*Aphis gossypii* Glov) และเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาว(*Aphis craccivora* Koch)

ตัวอย่างเพลี้ยอ่อนมะเขือได้จากภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ตัวอย่างเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาวจากจังหวัดบุรีรัมย์ โดยความอนุเคราะห์จาก ดร. วิจิตร วิโสรัมย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ

2. การเตรียม cDNA ของยีนไวเทลโลเจนิน

สกัด total RNA จากตัวอย่างเพลี้ยอ่อนมะเขือ (*Aphis gossypii* Glov) และเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาว (*Aphis craccivora* Koch) ด้วย Trizol Reagent (Gibco-BRL, USA) และวิเคราะห์ปริมาณและคุณภาพของ RNA ด้วยเทคนิค spectrophotometry และ agarose gel electrophoresis นำ total RNA ที่ได้มาสังเคราะห์ cDNA โดยใช้ชุดสังเคราะห์สาย cDNA สำเร็จรูป (cDNA synthesis kit) (Thermo Scientific, USA)

3. การออกแบบไพรเมอร์ (Primer)

นำลำดับนิวคลีโอไทด์กับสิ่งมีชีวิตที่มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกันกับเพลี้ยอ่อนมะเขือและเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาวมาเปรียบเทียบ เลือกบริเวณที่ลำดับนิวคลีโอไทด์มีการอนุรักษ์มาใช้เป็นไพรเมอร์ เพื่อนำไปใช้ในการ

เพิ่มปริมาณดีเอ็นเอเป้าหมายจากตัวอย่างเพลี้ยอ่อนมะเขือและเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาว ด้วยเทคนิค Polymerase Chain Reaction (PCR)

4. การเพิ่มปริมาณชิ้นดีเอ็นเอและการหาลำดับนิวคลีโอไทด์

ทำการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอเป้าหมาย แล้วนำมาโคลนเข้าสู่พลาสมิด pGEM-T easy vector แล้วส่งไปหาลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ บริษัท Macrogen ประเทศเกาหลี

ผลการและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่า ส่วน open reading frame (ORF) ของยีนไวเทลโลเจนินในเพลี้ยอ่อนทั้งสองชนิด มีความยาวของลำดับนิวคลีโอไทด์ 2,826 คู่เบส แปลรหัสเป็นกรดอะมิโนได้ 941 เรซิดิวส์ (ภาพที่ 1) เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมในฐานข้อมูล พบว่า AgVg มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 108.65 กิโลดาลตัน มีค่า Theoretical pI เท่ากับ 6.44 และ AcVg มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 108.66 กิโลดาลตัน มีค่า Theoretical pI เท่ากับ 6.52 ซึ่งโปรตีนไวเทลโลจีนินประกอบด้วย domain ที่สำคัญ คือ Lipoprotein N-terminal Domain (LPD_N) พบอยู่ในตำแหน่งกรดอะมิโนที่ 35-573 และเมื่อนำลำดับนิวคลีโอไทด์และกรดอะมิโนของเพลี้ยทั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบกันพบว่ามีความเหมือน (identity) คิดเป็น 97% และมีลำดับนิวคลีโอไทด์ที่น่าจะเป็นตำแหน่งตัด (RXXR) 2 ตำแหน่งคือ RHIR และ RFQR ซึ่งอยู่ในตำแหน่งกรดอะมิโนที่ 494-497 และตำแหน่งที่ 760-763 ตามลำดับ มีส่วนของกรดอะมิโน 19 เรซิดิวส์ที่เป็น signal peptide พบจำนวนกรดอะมิโนซีสเทอีน (cysteine) 11 เรซิดิวส์ ใน AgVg และ 10 เรซิดิวส์ ใน AcVg ซึ่งตำแหน่งที่ไม่พบกรดอะมิโนซีสเทอีน ใน AcVg คือตำแหน่งที่ 832 เมื่อนำกรดอะมิโนของ AgVg และ AcVg มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของแมลงที่มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกัน ที่มีในฐานข้อมูล พบว่ามีความเหมือน (identity) 94-98 % กับ *Aphis medicaginis* และ *Acyrthosiphon pisum*



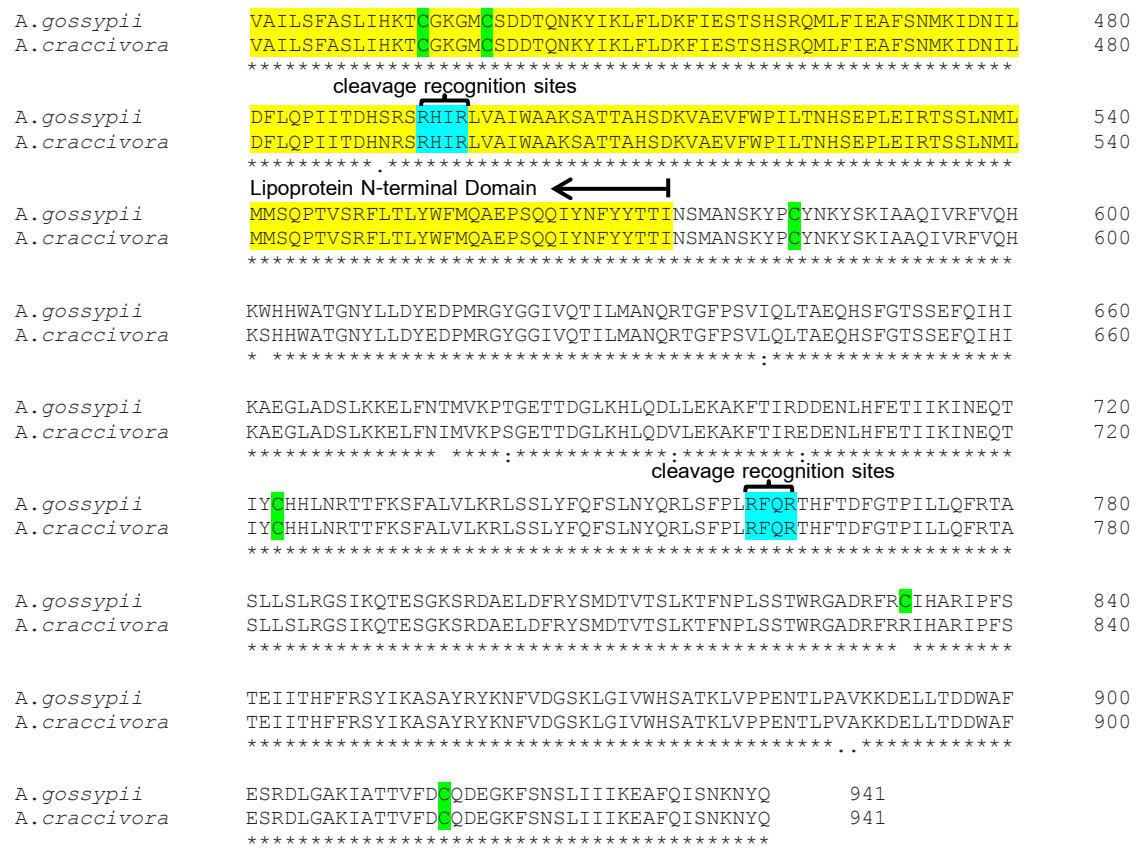


Figure 1 Vitellogenin amino acid sequences of *A. gossypii* Glov and *A. craccivora* Koch. The signal peptide was red highlighted. Lipoprotein N-terminal Domain (LPD_N) was yellow highlighted. Cysteine amino acid showed green highlighted and two putative cleavage recognition sites (RHIR and RFQR) showed blue highlighted.

สรุป

จากการศึกษาพบว่า ส่วน open reading frame (ORF) ของยีนไวเทลโลเจนินในเพลี้ยอ่อนทั้งสองชนิด มีความยาวของลำดับนิวคลีโอไทด์ 2,826 คู่เบส โปรตีนไวเทลโลเจนินประกอบด้วยกรดอะมิโน 941 เรซิดิวส์ เมื่อนำมาคำนวณค่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนไวเทลโลเจนินใน AgVg พบว่ามีค่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีน Vg เท่ากับ 108.65 กิโลดาลตัน ค่า Theoretical pI เท่ากับ 6.44 และใน AcVg ค่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีน Vg เท่ากับ 108.66 กิโลดาลตัน ค่า Theoretical pI เท่ากับ 6.52 โดยทั้งโปรตีน AgVg และ AcVg มี โดเมนที่สำคัญ คือ Lipoprotein N-terminal Domain (LPD_N) ซึ่งอยู่ในตำแหน่งกรดอะมิโนที่ 35-573 โปรตีน AgVg และ AcVg ประกอบด้วยกรดอะมิโนซีสเทอีน (cysteine) 11 เรซิดิวส์ และ 10 เรซิดิวส์ ตามลำดับ และมีส่วนของกรดอะมิโนที่เป็น signal peptide 19 เรซิดิวส์ อยู่ในตำแหน่งที่ 1-19 ความเหมือน (identity) ของนิวคลีโอไทด์และลำดับกรดอะมิโนของ AgVg เทียบกับของ AcVg คิดเป็น 97% และกรดอะมิโนทั้งสองมีความเหมือน (identity) กับของ *Aphis medicaginis* และ *Acyrthosiphon pisum* คิดเป็น 94-98%

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณตัวอย่างเพลี้ยอ่อนถั่วฝักยาวจากดร. วิจิตร โสรัมย์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ และตัวอย่างเพลี้ยอ่อนมะเขือจากคุณลม แก้วพามา และคุณสมหมาย แก้วพามา จากจังหวัดอุตรดิตถ์ ขอบคุณการสนับสนุนจากสาขาพันธุวิศวกรรม สาขาพันธุศาสตร์ และสถานที่ทำการทดลอง ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

เอกสารอ้างอิง

Austin, L., 2010. Evolutionary conservation of amino acid composition in paralogous insect vitellogenins. **Gene** 467: 35-40.

Charniaux-Cotton, H. 1985. Vitellogenesis and its control in Malacostracan Crustacea. **Amer. Zool.** 25: 197-206.

Cheon, H.M., H.J. Kim, C.Y. Yun, H.J. Lee, I.H. Lee, P.D. Shirk and S.J. Seo. 2003. Fat body expressed yolk protein genes in *Hyphantria cunea* are related to the YP4 follicular epithelium yolk protein subunit gene of pyralid moths. **Insect Mol. Bio**. 12 (4): 383-392.

Muhammad, T and M. Takeda. 2008. Molecular characteristics of insect vitellogenins. **Journal of Insect Physiology**. 54: 1447-1458.

Opresko, L.K., Karpf, R.A. Specific proteolysis reculate fusion between endocytic compartment in Xenopus oocytes. **Cell** 51 :557-568 (1987a).

Opresko, L.K., Wiley, H.S. Receptor-mediated endocytosis in Xenopus oocytes. I. Characterization of the vitellogenin receptor system. **J. Biol. Chem**. 262: 4109-4115 (1987b).

Paul, D., S.D. Bean., A. M. Miaaemann and V. J. Brookes. 1984. Identification, Synthesis, and Characterization of the yolk polypeptides of *Plodia interpunctella*. **Zoology** 232: 87-98.

ผลของสารอาหารไนเตรทกับการทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังของสบู่ดำ

The Effect of Nitrate Supplementation in Waterlogging Tolerance of Jatropha

ภัทราลักษณ์ ส่งเสริม[1] และ ปิยะดา จันทวงศ์[1*]

Pattralak Songserm[1] and Piyada Juntawong[1*]

บทคัดย่อ

สบู่ดำเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะแห้งแล้ง สารอาหารไนเตรทเป็นแหล่งไนโตรเจนหลักที่ช่วยทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตและทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้ดีขึ้น แต่กลไกดังกล่าวในสบู่ดำยังไม่มีการศึกษาที่ชัดเจน งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของสารอาหารไนเตรทกับการทนต่อสภาวะดังกล่าว รวมทั้งการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของไนโตรเจนของสบู่ดำ 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ไม่ได้รับ และกลุ่มที่ได้รับสารอาหารไนเตรท หลังจากนั้นทำให้สบู่ดำกลุ่มทดลองอยู่ในสภาวะน้ำท่วมขังตลอดการทดลอง 1 วันและ 5 วัน และกลุ่มควบคุม พบว่าสารอาหารไนเตรทไม่มีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ และปริมาณคาร์โบไฮเดรต แต่มีผลต่อปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้นในรากของกลุ่มที่ได้รับสารอาหารไนเตรท การแสดงออกของยีน *Alcohol dehydrogenase (ADH)*, *Nitrate Reductase* (*NR*), *Nitrite Reductase* (*NiR*) ด้วยวิธี RT-PCR โดยใช้ยีน *Ubiquitin* (*UB*) เป็นยีนอ้างอิง พบว่าในกลุ่มที่ได้รับไนเตรทการแสดงออกของ *ADH*, *NR และ NiR* กลุ่มทดลอง 1 วัน และ 5 วัน เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ขณะที่การแสดงออกของยีน *NR และ NiR* ของกลุ่มทดลอง 5 วัน เพิ่มมากขึ้นกว่ากลุ่มไม่ได้รับไนเตรทด้วยเช่นกัน ดังนั้นการได้รับสารอาหารไนเตรทก่อนการเกิดความเครียดจากสภาวะน้ำท่วมขัง อาจเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้สบู่ดำสามารถทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้ดีขึ้น

ABSTRACT

Jatropha Curcas is a plant with drought tolerance characteristics. Nitrate is a major nitrogen source for plants and nitrate fertilization induce growth and improves tolerance to waterlogging. The mechanisms of nitrate supplementation to improve waterlogging tolerance in jatropha is still mysterious. Therefore, the purpose of this study was to investigate the effect of nitrate supplementation in improvement of waterlogging in jatropha and expression of gene involved nitrogen metabolism. Prior waterlogging treatment, jatropha plants were supplied with or without nitrate. Jatropha plants were divided into 3 groups; control, waterlogging stressed 1d and 5 d. RT-PCR was used to analyze the expression level of *ADH*, *NR*, *NiR* and *UB* genes. Chlorophyll and total soluble carbohydrates were not significantly different but levels of total protein from roots were significantly different. Expression levels of *ADH, NR* and *NiR* from roots under waterlogging stress increased from the control. Nitrate supplementation may be one method to improve waterlogging tolerance in jatropha.

Key Words: jatropha, nitrate supplementation, waterlogging

* Corresponding author; e-mail address: **pjuntawong@gmail.com**

[1]ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Genetics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

สบู่ดำ (*Jatropha Curcas*) เป็นพืชที่ปลูกง่าย มีความทนทานต่อสภาวะแห้งแล้ง เจริญเติบโตได้รวดเร็ว สามารถปลูกได้ทุกภาคในประเทศไทย รวมทั้งให้ปริมาณน้ำมันในเมล็ดสูงเหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน (Makkar *et al*., 1997) แต่เนื่องจากสบู่ดำเป็นพืชที่ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะน้ำท่วมขัง (Fairless, 2007) ซึ่งส่วนใหญ่ประเทศไทยมักจะเกิดปัญหาดังกล่าว จึงส่งผลโดยตรงกับการเจริญเติบโตของรากรวมทั้งทำให้พืชมีการเจริญเติบโตน้อยลง (Pradhan and Mohanty, 2013) ดังนั้นพืชจึงมีการตอบสนองเพื่อให้สามารถอยู่รอดเมื่ออยู่ในสภาวะเครียดน้ำอยู่ 2 รูปแบบ คือหลีกเลี่ยงหรือหนีสภาวะนั้น และทนต่อสภาวะนั้นให้ได้ (Scott, 2000) แต่การตอบสนองหรือการปรับตัวอันดับแรกเมื่อพืชอยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง คือการเปลี่ยนแปลงการหายใจจากการใช้ออกซิเจน เปลี่ยนไปเป็นไม่ใช้ออกซิเจน (Fermentation) เพื่อสร้าง ATP ให้พืชสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้ (Pradhan and Mohanty, 2013) นอกจากนี้มีการศึกษาว่าสารอาหารไนเตรทซึ่งเป็นแหล่งไนโตรเจนหลักให้แก่พืช (Crawford and Forde, 2002) ช่วยทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตและทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังหรือสภาวะออกซิเจนต่ำในดินได้ดีขึ้น (Horchani *et al*., 2010) ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้มีแนวความคิดที่จะนำสารอาหารไนเตรทนำมาทดลองกับสบู่ดำเพื่อศึกษาปริมาณคลอโรฟิลล์ ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ปริมาณโปรตีน และระดับการแสดงออกของยีนที่กำหนดการสร้างเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเมแทบอลิซึมของไนโตรเจน โดยผู้วิจัยมีสมมติฐานว่าสบู่ดำที่ได้รับสารอาหารไนเตรทก่อนการเกิดความเครียดจากสภาวะน้ำท่วมขัง ย่อมมีการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของไนโตรเจนในระดับที่แตกต่างกัน รวมทั้งอาจเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้สบู่ดำสามารถทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้ดีขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) จำนวน 4 ซ้ำ แบ่งสบู่ดำออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ไม่ได้รับสารอาหารไนเตรท และ กลุ่มที่ได้รับสารอาหารไนเตรท หลังจากนั้นแบ่งสบู่ดำดังกล่าวออกเป็น 3 กลุ่มย่อย เป็นกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้อยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง และกลุ่มทดลองที่อยู่ในสภาวะน้ำท่วมขังตลอดการทดลอง 1 วันและ 5 วัน ดังนี้

1. กลุ่มที่ไม่ได้รับสารอาหารไนเตรท – กลุ่มควบคุม (0 วัน) และกลุ่มทดลอง (1, 5 วัน)
2. กลุ่มที่ได้รับสารอาหารไนเตรท – กลุ่มควบคุม (0 วัน) และกลุ่มทดลอง (1, 5 วัน)

พืชทดลอง

นำต้นสบู่ดำพันธุ์ชัยนาท จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (กำแพงแสน) อายุประมาณ 1 เดือน แบ่งสบู่ดำออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ไม่ได้รับสารอาหารไนเตรท และ กลุ่มที่ได้รับสารอาหารไนเตรท (5 กรัมต่อต้น) นาน 2 วัน หลังจากนั้นทำให้สบู่ดำอยู่ในสภาวะน้ำท่วมระยะสั้นและระยะยาวโดยให้สบู่ดำอยู่ในสภาวะน้ำท่วมขังตลอดการทดลอง 1 วัน และ 5 วัน ตามลำดับ (Table 1) แล้วเก็บเนื้อเยื่อใบและรากที่ไว้ที่อุณหภูมิ -80 $^{\circ}$C เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

Table 1 Phenotypes of jatropha plants under waterlogging for 0, 1 and 5 d with or without nitrate supplementation.

Treatments	0 day	1 day	5 days
No Nitrate	 Waterlogging Control	 Waterlogging Control	 Waterlogging Control
Nitrate	 Waterlogging Control	 Waterlogging Control	 Waterlogging Control

การศึกษาการแสดงออกของยีนด้วยวิธี RT-PCR

สกัด total RNA จากเนื้อเยื่อรากสบู่ดำด้วยวิธีของ Chaudhary, 2011 ตรวจสอบความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของ RNA ที่ได้ด้วยเครื่อง NanoDrop spectrophotometer กำจัด genomic DNA ด้วยเอนไซม์ DNase และทำความสะอาด RNA ผ่าน column โดยใช้ GF-1 Total RNA Extraction Kit (Vivantis, Malaysia)จากนั้นทำการสังเคราะห์ cDNA โดยใช้ไพรเมอร์ชนิดออลิโกดีที (oligo dT primer) เอนไซม์ ProtoScript®II Reverse Transcriptase kit (Biolab, New England) ที่อุณหภูมิ 42 °C เก็บรักษา cDNA ที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิ -20 °C ออกแบบไพรเมอร์ที่จำเพาะต่อการเพิ่มปริมาณชิ้นดีเอ็นเอของยีน *Alcohol dehydrogenase* (*ADH*), *Nitrate Reductase* (*NR*), *Nitrite Reductase* (*NiR*) และใช้ยีน *Ubiquitin* (*UB*) เป็นยีนอ้างอิง จากนั้นหาอุณหภูมิ annealing และจำนวนรอบที่เหมาะสมในการทำพีซีอาร์ของไพรเมอร์ (Table 2) ตรวจสอบผลผลิตของปฏิกิริยา RT-PCR ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรโฟริซีสในวุ้นอะกาโรสที่มีความเข้มข้น 1% ส่องดูภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตโดยใช้เครื่อง Gel documentation system

Table 2 Information of primers used for semi-quantitative RT-PCR analysis.

Primer name	Primer sequence	Annealing temperature (°C)	Cycles of PCR
ADH-F	5'-ATGACAAACACTGCAGGAAAAGTCATTC-3'	52	30
ADH-R	5'-CAACACTTTCCACAATCCCTCCTG-3'	52	30
NR-F	5'-ATCCATCGCGTGATATCATATTAG-3'	54	30
NR-R	5'-GGCTTATACCACCATGCTTC-3'	54	30
NiR-F	5'-CTAATTTGCCAAGGAAATGG-3'	54	30
NiR-R	5'-GAACTGGGCGTTGAAGG-3'	54	30
UB-F	5'-ATGTCCTCTCCAAGCAAACG-3'	52	30
UB-R	5'-AACAGAGCCAGACATTTCATC-3'	52	30

การวัดปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบี

ชั่งเนื้อเยื่อใบที่บดละเอียดน้ำหนัก 0.1 กรัม ในหลอดทดลอง 15 มิลลิลิตร แล้วเติม 100% methanol 3 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 4 °C 20 นาที 21000 รอบ/นาที นำสารละสารชั้นบนมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 652 nm. (A652) และ 665.2 nm. (A665.2) คำนวณอัตราส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีในใบ (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) โดยเทียบกับสูตรคำนวณ (Porra *et al*., 2002)

ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ = 16.29*(A665.2) - 9.55*(A652) .....(1)

ปริมาณคลอโรฟิลล์บี = 30.66*(A652) - 13.58*(A665.2) .....(2)

อัตราส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี = (1) / (2)

การวัดปริมาณคาร์โบไฮเดรต

ชั่งเนื้อเยื่อรากที่บดละเอียดน้ำหนัก 0.1 กรัม ในหลอดทดลอง 15 มิลลิลิตร แล้วเติม 2.5N HCl ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ที่ 90°C นาน 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิสักครู่ เติมโซเดียมคาร์บอเนตจนกระทั่งฟองอากาศหายไป นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 5 นาที 12000 รอบ/นาที นำสารละสารชั้นบน 1 มิลลิลิตร มารวมกับ anthrone reagent 4 มิลลิลิตร หลังจากนั้นแช่ทิ้งไว้ที่ 90°C นาน 8 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 nm (OD630) โดยใช้น้ำ เป็น blank คำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตในราก โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของ glucose (Fukao *et al*., 2006)

การวัดปริมาณโปรตีน

ชั่งเนื้อเยื่อใบและรากที่บดละเอียดน้ำหนัก 0.2 กรัม ในหลอดทดลอง 1.5 มิลลิลิตร แล้วเติม extraction buffer ปริมาตร 800 ไมโครลิตร และ 400 ไมโครลิตร ในเนื้อเยื่อใบและรากตามลำดับ นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 4 °C 60 นาที 12000 รอบ/นาที นำสารละสารชั้นบนมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 nm (OD595) โดยใช้น้ำ เป็น blank คำนวณปริมาณโปรตีนในใบและราก โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Bovine serum albumin (BSA) รวมทั้งนำโปรตีนที่สกัดได้ (25 ไมโครลิตร) มาตรวจสอบซ้ำอีกครั้งด้วย Sodium Dodecyl Sulfate Poly-

Acrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE) และย้อมด้วยสี Coomassie Coomassie Brilliant Blue R-250 (Tamang *et al*., 2014)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริมาณคลอโรฟิลล์

ปริมาณอัตราส่วนคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีกลุ่มไม่ได้รับไนเตรท (No Nitrate) ในกลุ่ม 0, 1 และ 5 วัน (Figure 1A) เท่ากับ 4.100, 3.765 และ 3.537 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ และกลุ่มได้รับไนเตรท (Nitrate) ในกลุ่ม 0, 1 และ 5 วันเท่ากับ 3.838, 3.596 และ 3.377 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีกลุ่มไม่ได้รับไนเตรทและได้รับไนเตรท มีค่าลดลงตามสภาวะน้ำท่วมขังที่รุนแรงขึ้น และมีเพียงกลุ่มทดลอง 5 วันของทั้งสองกลุ่ม ที่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นสารอาหารไนเตรทไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ในสบู่ดำเมื่ออยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง

ปริมาณคาร์โบไฮเดรต

ปริมาณคาร์โบไฮเดรตกลุ่มไม่ได้รับไนเตรท (No Nitrate) ในกลุ่ม 0, 1 และ 5 วัน (Figure 1B) เท่ากับ 123.962, 124.351 และ 118.420 มิลลิกรัมกลูโคส/100 มิลลิกรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ และกลุ่มได้รับไนเตรท (Nitrate) ในกลุ่ม 0, 1 และ 5 วันเท่ากับ 133.069, 134.411 และ 133.281 มิลลิกรัมกลูโคส/100 มิลลิกรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ พบว่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตกลุ่มไม่ได้รับไนเตรทและได้รับไนเตรท มีค่าลดลงหลังจากสบู่ดำถูกน้ำท่วมผ่านไป 1 วัน ซึ่งปริมาณคาร์โบไฮเดรตระหว่างทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างกัน ดังนั้นสารอาหารไนเตรทไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณคาร์โบไฮเดรตในสบู่ดำเมื่ออยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง

ปริมาณโปรตีน

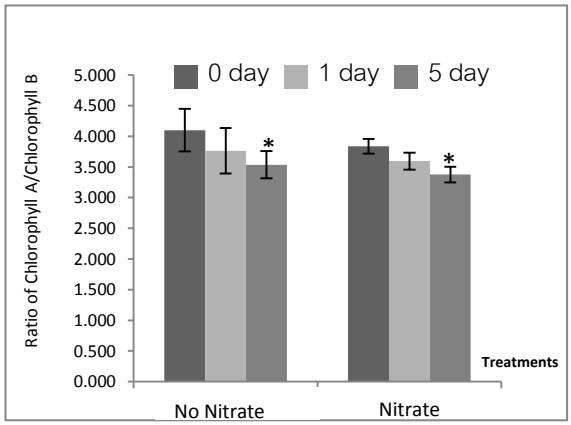
ปริมาณโปรตีนระหว่างกลุ่มไม่ได้รับไนเตรท (No Nitrate) และกลุ่มได้รับไนเตรท (Nitrate) ในใบ (Figure 1C, Figure 1D) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ขณะที่ปริมาณโปรตีนในราก (Figure 1E, Figure 1F) กลุ่มควบคุม และ กลุ่มทดลอง 1 และ 5 วัน ของกลุ่มได้รับไนเตรทมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มไม่ได้รับไนเตรท ดังนั้นการสะสมไนโตรเจนปริมาณมากขึ้นจากการใส่ไนเตรทก่อนนำสบู่ดำมาอยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง ส่งผลทำให้รากมีการสะสมโปรตีนเพิ่มมากขึ้นในขณะที่เกิดน้ำท่วมขัง

ตรวจสอบระดับการแสดงออกของยีนที่ศึกษา

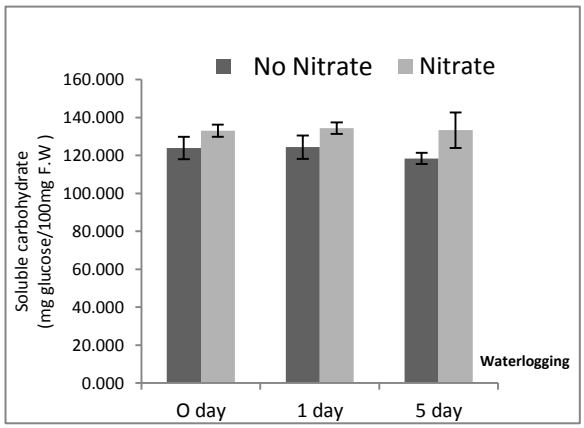
ตรวจสอบระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ไนโตรเจน *NR* และ *NiR* รวมทั้งยีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการปรับตัวของพืชเมื่อพืชหายใจโดยไม่ใช้ออกซิเจน *ADH* (Figure 2A) จากรากสบู่ดำ พบว่ากลุ่มไม่ได้รับไนเตรท (No Nitrate) มีระดับการแสดงออกของยีน *ADH* ในกลุ่มทดลองมีการแสดงออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม สอดคล้องกับ Juntawong *et al*. (2014) พบว่าในรากสบู่ดำที่ถูกน้ำท่วมขังมีการแสดงออกของยีน *ADH* เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม นอกจากนี้การแสดงออกของยีน *NR* และ *NiR* ในกลุ่มทดลองมีการแสดงออกเพิ่มมากขึ้นใน 1 วัน เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการ Denitrification เกิดการเปลี่ยนแปลง nitrate เป็น nitrogen มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic) และกลุ่มได้รับไนเตรท (Nitrate) ระดับการแสดงออกของยีน *ADH, NR*

และ *NiR* ในกลุ่มทดลอง 1 วัน และ 5 วัน มีการแสดงออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม รวมถึงกลุ่มทดลอง 5 วัน *NR* และ *NiR* แสดงออกเพิ่มมากขึ้นกว่ากลุ่มไม่ได้รับไนเตรทด้วยเช่นกัน ดังนั้นสารอาหารไนเตรทมีผลต่อการแสดงออกของยีนที่กำหนดการสร้างเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการปรับตัวของพืชเมื่อพืชหายใจโดยไม่ใช้ออกซิเจน และกระบวนการเมแทบอลิซึมของไนโตรเจน

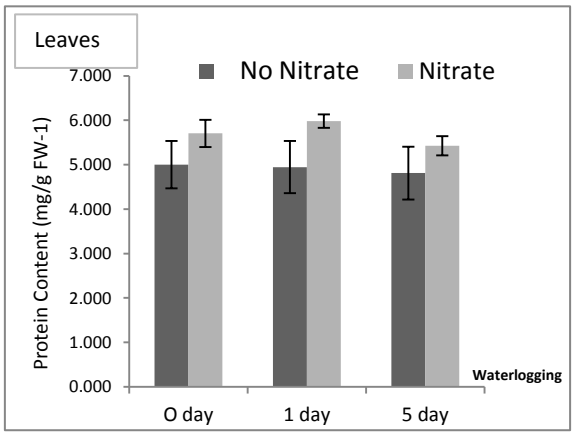
(A)



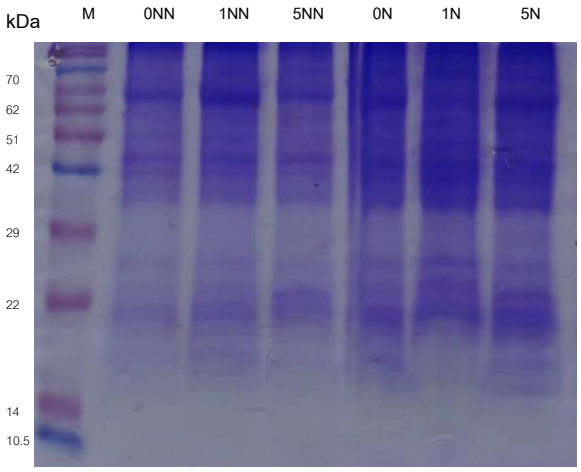
(B)



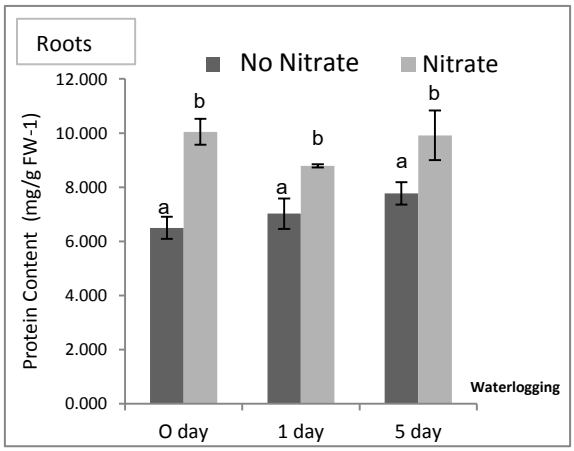
(C)



(D)



(E)



(F)

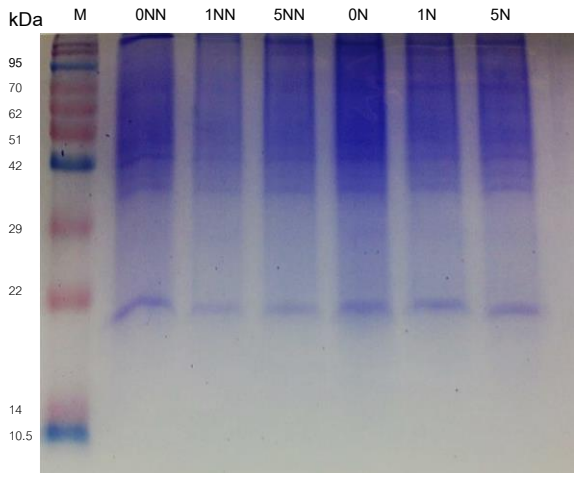


Figure 1 Physiological responses of Jatropha plants under waterlogging for 0, 1 and 5 d with nitrate (N) or without (NN) nitrate supplementation. The content of Chlorophyll A/B ratios (A), data are presented as mean±s.e. (n=4), asterisks indicate statistically significant significance (P<0.05, paired T-Test). Total soluble carbohydrate was assayed by anthrone method (B). Total protein content was assayed by Bradford method in leaves (C) and roots (E) and data are presented as mean±s.e. (n=3), the different letters are significantly different (P<0.05, one-way ANOVA, Tukey HSD post-hoc test). Total protein was fractionated in a 12% SDS-PAGE gel and stained with Coomassie Brilliant Blue R-250 in leaves (D) and roots (F).

(A) (B) (C)

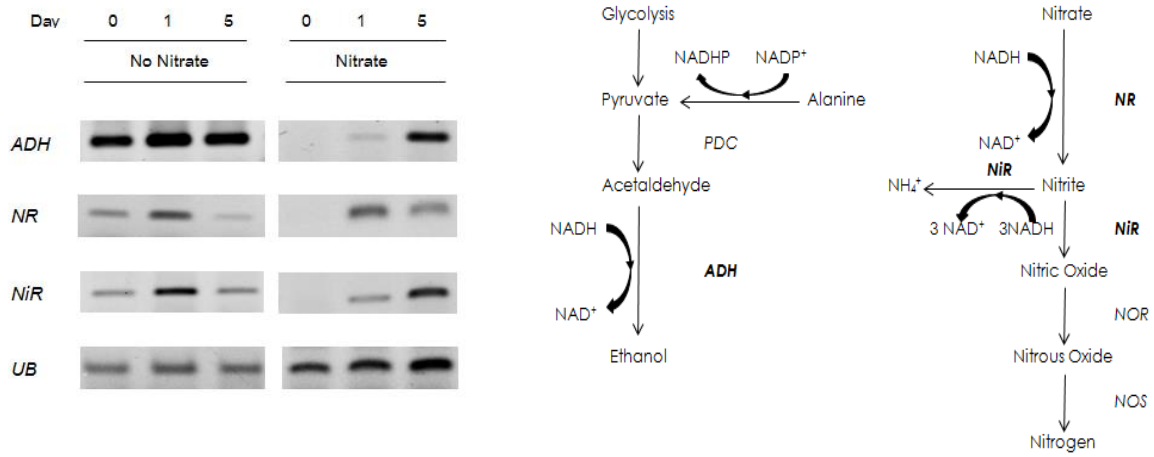


Figure 2 (A) Semi-quantitative RT-PCR analysis of *Alcohol Dehydrogenase* (*ADH*), *Nitrate Reductase* (*NR*), *Nitrite Reductase* (*NiR*) genes. *Ubiquitin* (*UB*) was used as reference gene. Gene expression analysis from roots of Jatropha under waterlogging for 0, 1 and 5 d with or without nitrate supplementation. (B) Pathways of glycolysis and fermentation ; *PDC =Pyruvate Decarboxylase* (C) Pathways of nitrogen metabolism ; *NOR =Nitric Oxide Reductase, NOS =Nitrous Oxide Reductase*.

สรุป

สารอาหารไนเตรทที่ทำการทดลองไม่มีผลต่อปริมาณอัตราส่วนคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บี รวมทั้งปริมาณคาร์โบไฮเดรต แต่มีผลทำให้ปริมาณโปรตีนในรากสบู่ดำเพิ่มขึ้น เมื่ออยู่ในสภาวะน้ำท่วมขัง พบว่าระดับการแสดงออกของยีนที่กำหนดการสร้างเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเมแทบอลิซึมของไนโตรเจน *NR และ NiR* ของกลุ่มทดลองมีการแสดงออกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ดังนั้นการได้รับสารอาหารไนเตรทก่อนการเกิดความเครียดจากสภาวะน้ำท่วมขัง อาจเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้สบู่ดำสามารถทนต่อสภาวะน้ำท่วมขังได้ดีขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนางสาวรัชนีภรณ์ พิมพ์จันทร์ และนางสาวสิริธร ก้งเส้งที่ช่วยรวบรวมสบู่ดำที่ใช้ในการทดลอง และขอบคุณครอบครัวส่งเสริม ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจจนงานสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

Chaudhary, S., P. Shah., M. K. Vyas., V. Kumar., N. Srivastava., K.H. Katudia, K.Vaidya and S.K. Chikara. 2011. Establishment of the Protocol for High Quality RNA Isolation from *Jatropha Curcas*. **Asian Journal of Experimental Biological Sciences** 01/2011; 2: 715-720.

Crawford, N. M and B. G. Forde. 2002. Molecular and Developmental Biology of Inorganic Nitrogen Nutrition. **The Arabidopsis Book / American Society of Plant Biologists**, 1.

Fairless, D. 2007. Biofuel: the little shrub that could-maybe. **Nature** 449: 652-655.

Fukao, T., K. Xu., P. C. Ronald and J. Bailey-Serres. 2006. A Variable Cluster of Ethylene Response Factor–Like Genes Regulates Metabolic and Developmental Acclimation Responses to Submergence in Rice. **The Plant Cell** 18(8), 2021–2034.

Horchani, F., S. Aschi-Smiti and R. Brouquisse. 2010. Involvement of nitrate reduction in the tolerance Of tomato (Solanum lycopersicum L.) plants to prolonged root hypoxia. **Acta Physiol Plant Journal** 32: 1113–1123.

Juntawong, P., A. Sirikhachornkit., R. Pimjan., C. Sonthirod., D. Sangsrakru., T. Yoocha., S. Tangphatsomruang and P. Srinives. 2014. Elucidation of the molecular responses to waterlogging in Jatropha roots by transcriptome profiling. **Frontiers in Plant Science** 5: 658.

Makkar, H.P.S. and K. Becker. 1997. ***Jatropha curcas* toxicity: identification of toxic principle(s)**. In: Garland, T., Barr, A.C. (Eds.), Toxic Plants and Other Natural Toxicants. CAB International, New York, pp. 554–558.

Porra R.J. 2002. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophyll a and b. **Photosynthesis research** 73, 149-156.

Pradhan, C. and M. Mohanty. 2013. Submergence Stress: Responses and adaptations in crop plants. **Molecular Stress Physiology of Plants.** Indea, 331-358.

Scott, P. 2000. Resurrection plants and the secrets of eternal leaf. **Annals of Botany** 85: 159–166.

Tamang, B. G., J. O. Magliozzi., M. A. Saghai Maroof and T. Fukao. 2014. Physiological and transcriptomic characterization of submergence and reoxygenation responses in soybean seedlings. **Plant Cell Environment** 37: 2350-2365.

อุทกธรณีเคมี ของแอ่งน้ำบาดาลแพร่ ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม

Hydrogeochemistry of Groundwater of the Phrae Basin in the Yom Catchment Area.

ปีย์วรา เจริญนา[1*] และ กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ[2*]

Peewara Charoenna[1*] and Kannaree Chuangcham[2*]

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางอุทกธรณีเคมี ของแอ่งน้ำบาดาลแพร่ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม โดยการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลทั้งหมด 59 บ่อบาดาล ใน 2 ช่วงฤดูกาลคือ ช่วงฤดูแล้ง (เดือนเมษายน-พฤษภาคม) และช่วงฤดูน้ำหลาก (เดือน กันยายน-ตุลาคม) ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี และอธิบายลักษณะปรากฏทางอุทกเคมีของชั้นน้ำแต่ละชั้นด้วย Piper Trilinear Diagram ผลการศึกษาพบว่าชั้นน้ำบาดาลในพื้นที่แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือชั้นหินร่วน และชั้นหินแข็ง โดยในชั้นหินร่วน แสดงลักษณะปรากฏทางอุทกเคมีแบบชนิดที่1 “Carbonate Hardness Facies” คือน้ำกระด้างชั่วคราวและชนิดที่2 “Carbonate Alkali Facies” คือน้ำอ่อน ในขณะที่ชั้นหินแข็งแสดงลักษณะปรากฏทางอุทกเคมีแบบชนิดที่1 “Carbonate Hardness Facies” คือน้ำกระด้างชั่วคราว เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำบาดาลทั้ง 2 ฤดูกาล พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏทางอุทกธรณีในบางพื้นที่ซึ่งบ่งชี้ถึงฤดูกาลเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลแพร่

ABSTRACT

This research aims to study hydrogeochemistry of groundwater of Phrae Basin in The Yom Catchment Area. The 59 groundwater samples were collected throughout the study area in dry season (April – May) and wet season (September –October) . The physical and chemical properties were analyzed as well as the hydrogeological facies were characterized by Piper Trilinear Diagram. The results of study revealed that the aquifers was divided into 2 types which were unconsolidated and consolidated Aquifer. Unconsolidated Aquifer showed the hydrogeological hydrochemistry facies type 1 “Carbonate Hardness Facies” indicating temporary hardness and fresh water and type 2 “Carbonate Alkali Facies” expressing soft and fresh water. The consolidated aquifer showed the hydrogeological facies type 1 “Carbonate Hardness Facies”. When comparing the quality of water in the first round sampling with the second round sampling, it found out that the hydrogeological facies had a little change in some locations which pointed out the seasonal fluctuation in the groundwater of Phrae basin.

Keyword :Hydrogeochemistry, Groundwater, Water quality, Yom River Basin

[1]Corresponding author; e-mail address: i_peewara@hotmail.com [2]อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

[*]ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[*]Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบัน น้ำบาดาลถือได้ว่าเป็นแหล่งน้ำสำรองที่สำคัญของประเทศ มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เนื่องจากน้ำบาดาลมีลักษณะเด่น คือ คุณภาพและอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ ปริมาณน้ำไม่ผันแปรตามฤดูกาล สามารถพัฒนาขึ้นมาใช้สลับกับน้ำผิวดินในช่วงประสบปัญหาภัยแล้งได้ อีกทั้งการลงทุนต่อหน่วย ต่ำกว่าการใช้น้ำประปา

พื้นที่ลุ่มน้ำยมตั้งอยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทย ประชากรส่วนใหญ่ในพื้นที่มีการนำทรัพยากรน้ำบาดาลมาใช้ประโยชน์สำหรับกิจกรรมต่างๆ อย่างมากมาย ทั้งด้านการอุปโภค บริโภค ด้านเกษตรกรรมและปศุสัตว์ รวมทั้งภาคอุตสาหกรรม และจากการขยายตัวของชุมชน ทำให้มีการใช้น้ำบาดาลอย่างเสรี ขาดการจัดการตามหลักวิชาการ ส่งผลให้เริ่มประสบกับปัญหาในเรื่องของปริมาณ และคุณภาพ หากมีการนำน้ำบาดาลเหล่านี้ขึ้นมาใช้ในการอุปโภคบริโภค สารปนเปื้อนต่างๆที่อยู่ในน้ำบาดาลจะส่งผลต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ รวมถึงสร้างความเสียหายให้กับบ่อบาดาล ทำให้อายุการใช้งานของบ่อสั้นลง และต้องใช้เงินจำนวนมากในการซ่อมบำรุง

การศึกษาในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ และเคมีของน้ำบาดาล บริเวณแอ่งน้ำบาดาลแพร่ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม เพื่อนำไปสู่การตรวจสอบติดตามการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำรวมทั้งการบริหารจัดการอย่างมีศักยภาพ และรักษาทรัพยากรที่มีค่านี้ไว้ เพื่อให้น้ำบาดาลสามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างยั่งยืน เพียงพอ มีคุณภาพที่ดี และปราศจากสารปนเปื้อน

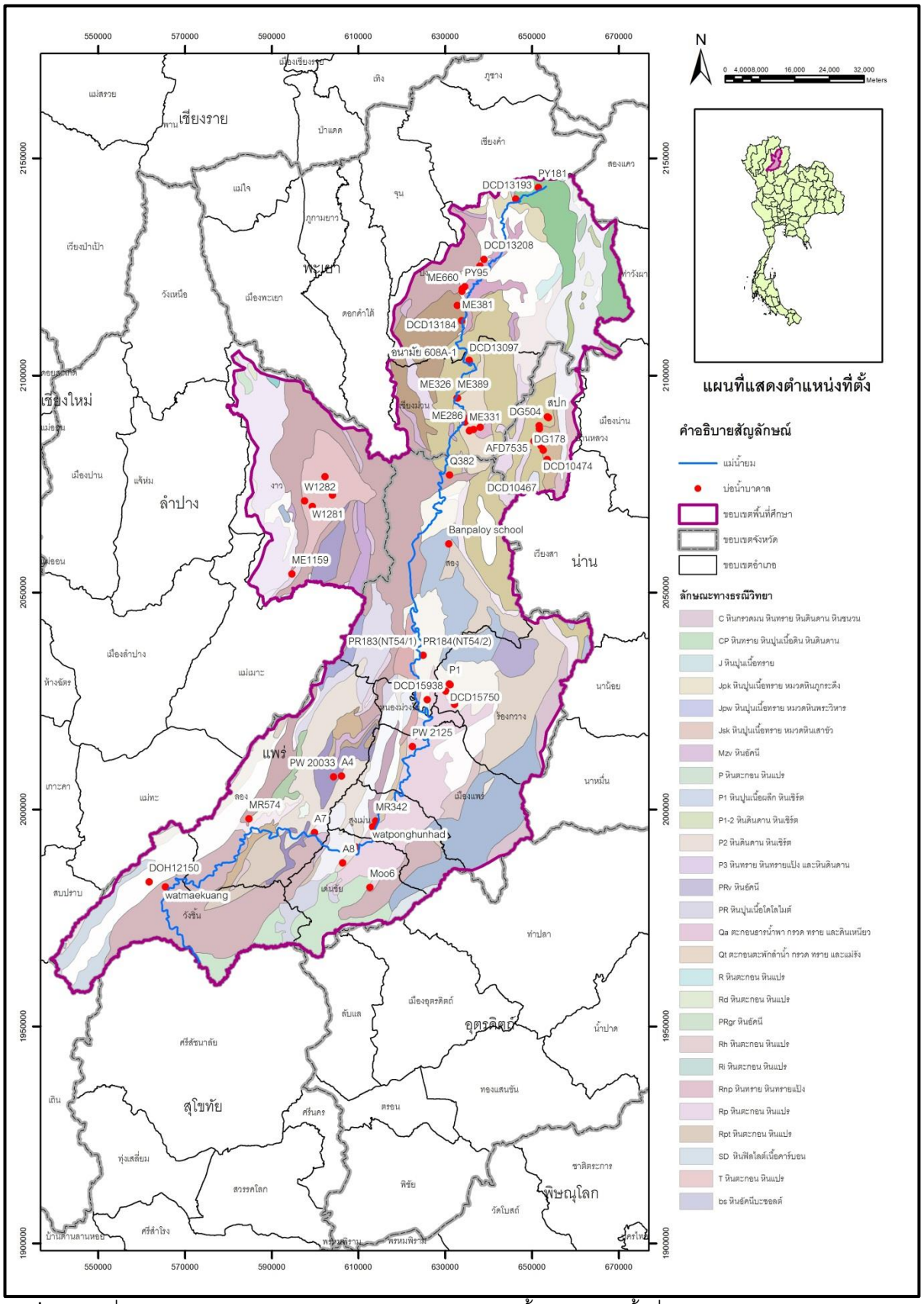
อุปกรณ์และวิธีการ

ศึกษาและรวบรวมข้อมูลบ่อน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลแพร่

ศึกษาลักษณะอุทกธรณีวิทยาของแอ่งน้ำบาดาลแพร่ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม ซึ่งมีพื้นที่ทั้งสิ้น 10,711 ตารางกิโลเมตร ประกอบไปด้วยพื้นที่ในจังหวัดแพร่ และพื้นที่บางส่วนในจังหวัดพะเยา น่าน และลำปาง รวมทั้งทำการกำหนดจุดเก็บตัวอย่างจำนวน 59 บ่อ ดังแสดงใน รูปที่ 1 และ ตารางที่ 1

การเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล

ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล ในพื้นที่ศึกษา 2 ครั้ง ช่วงฤดูแล้ง (เดือนเมษายน-พฤษภาคม) และช่วงฤดูน้ำหลาก (เดือน กันยายน-ตุลาคม) เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น สี กลิ่น ความขุ่น และคุณสมบัติทางเคมีได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ค่าความกระด้าง (Hardness and Alkalinity) ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดแคทไอออน (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) และแอนไอออน (Cl^-, HCO_3^-, NO_3^-, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}, SO_4^{2-}) เพื่อจำแนกชนิดของน้ำบาดาล (Hydrogeochemical Facies) โดยใช้ submersible pump สูบน้ำที่ค้างบ่อออกประมาณ 10-15 นาที เพื่อจะได้น้ำใหม่ที่ไหลเข้าบ่อ ขวดที่ใช้เก็บตัวอย่างน้ำใช้ขวดพลาสติก (Polyethylene) ก่อนทำการเก็บให้ล้างด้วยน้ำตัวอย่างที่จะเก็บก่อน 2 – 3 ครั้งแล้วเก็บตัวอย่างน้ำโดยไม่ต้องกรอง เก็บให้เต็มขวดประมาณ 1 ลิตร ปิดจุกให้แน่นเก็บไว้ในที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตามวิธีการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล ประกาศโดยกรมทรัพยากรธรณี ฉบับที่ 9 (พ.ศ.2542)



รูปที่ 1 แผนที่ลักษณะทางธรณีวิทยา และตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งแพร่

ตารางที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานของบ่อน้ำบาดาลที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งแพร่

ชื่อบ่อ	ที่ตั้ง		พิกัดบ่อ		ชนิดชั้นน้ำบาดาล
	อำเภอ	จังหวัด	E	N	
A4	ลอง	แพร่	606108	2007642	Pc
A7	ลอง	แพร่	599882	1994652	Qfd
A8	เด่นชัย	แพร่	606334	1987629	Trlp
AFD7532	บ้านหลวง	น่าน	653772	2090284	Qfd
AFD7535	บ้านหลวง	น่าน	651675	2087715	Qfd
AFD7725	เชียงม่วน	พะเยา	634531	2089545	Qfd
AFD7726	เชียงม่วน	พะเยา	634479	2090133	Qfd
Banpaloy school	สอง	แพร่	630816	2061187	Pc
DCD10464	บ้านหลวง	น่าน	653402	2078896	Qfd
DCD10465	บ้านหลวง	น่าน	653497	2080600	Qfd
DCD10467	บ้านหลวง	น่าน	653516	2078601	Qfd
DCD10474	บ้านหลวง	น่าน	652561	2082775	Qfd
DCD10478	บ้านหลวง	น่าน	652050	2083756	Qfd
DCD13089	เชียงม่วน	พะเยา	634528	2089264	Qfd
DCD13097	เชียงม่วน	พะเยา	635567	2103136	Qfd
DCD13181	ปง	พะเยา	633813	2112614	Qfd
DCD13184	ปง	พะเยา	632791	2116102	Qfd
DCD13193	ปง	พะเยา	646251	2140621	Qfd
DCD13208	ปง	พะเยา	638899	2126749	Qfd
DCD15749	ร้องกวาง	แพร่	632120	2024155	Qfd
DCD15750	ร้องกวาง	แพร่	631136	2028701	Qfd
DCD15866	วังชิ้น	แพร่	568114	1985729	Trlp
DCD15938	สอง	แพร่	625853	2025275	Qfd
DG178	บ้านหลวง	น่าน	650448	2084861	Qyt
DG504	บ้านหลวง	น่าน	651660	2088403	Qyt
DOH12150	วังชิ้น	แพร่	561719	1983259	Trlp
DOH16120	งาว	ลำปาง	604018	2072413	Trlp
ME1129	งาว	ลำปาง	603385	2074319	Qfd
ME1140	งาว	ลำปาง	602301	2076635	Qyt
ME1159	งาว	ลำปาง	594635	2054245	Qfd

ชื่อบ่อ	ที่ตั้ง		พิกัดบ่อ		ชนิดชั้นน้ำบาดาล
	อำเภอ	จังหวัด	E	N	
ME286	เชียงม่วน	พะเยา	636528	2087497	Qyt
ME326	เชียงม่วน	พะเยา	632701	2094787	Qyt
ME331	เชียงม่วน	พะเยา	635553	2087225	Qyt
ME381	ปง	พะเยา	633930	2119898	Qfd
ME389	เชียงม่วน	พะเยา	632808	2094771	Qfd
ME660	ปง	พะเยา	633872	2119328	Qfd
Moo6	เด่นชัย	แพร่	612629	1982021	Pc
MR342	สูงเม่น	แพร่	613967	1997302	Qfd
MR458	เด่นชัย	แพร่	609448	1991291	Qfd
MR574	ลอง	แพร่	584769	1997801	Qyt
P1	ร้องกวาง	แพร่	630915	2028901	Qfd
papabandontan	สูงเม่น	แพร่	618793	2001068	Qfd
PR183(NT54/1)	สอง	แพร่	624907	2035499	Qyt
PR184(NT54/2)	สอง	แพร่	624906	2035500	Qyt
PW 20033	ลอง	แพร่	604270	2007446	Pc
PW 2125	เมือง	แพร่	622403	2014462	Qfd
PW18532	เชียงม่วน	พะเยา	638064	2088043	Qfd
PW22454	ปง	พะเยา	638002	2125182	Qfd
PW8147	เชียงม่วน	พะเยา	635630	2087357	Qyt
PY181	ปง	พะเยา	651416	2143278	Trlp
PY95	ปง	พะเยา	634477	2120401	Trlp
Q382	สอง	แพร่	631013	2077030	Qfd
W1281	งาว	ลำปาง	599361	2069795	Trlp
W1282	งาว	ลำปาง	597577	2071063	Trlp
watmaekuang	วังชิ้น	แพร่	565477	1982130	Pc
watponghunhad	สูงเม่น	แพร่	613276	1995972	Qfd
watyangyung	ร้องกวาง	แพร่	630097	2027203	Qyt
สปก	บ้านหลวง	น่าน	653557	2090437	Trlp
อนามัย 608A-1	เชียงม่วน	พะเยา	635502	2103436	Trlp

วิธีการตรวจวัด/ วิเคราะห์

คุณลักษณะของน้ำบาดาลที่ศึกษาในงานวิจัย และวิธีการตรวจวัด/วิเคราะห์ (ตารางที่ 2) ได้ดำเนินการตามวิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (Standard Method for the Examination of Water and Wastewater) กำหนดโดย APHA, AWWA และ WEF (1998) ประมวลผลคุณภาพน้ำบาดาล พร้อมทั้งอธิบายลักษณะปรากฏทางอุทกเคมีของชั้นน้ำแต่ละชั้นในพื้นที่ศึกษา ด้วย Piper Trilinear Diagram

ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา 2 ครั้ง ช่วงฤดูแล้ง (เดือนเมษายน-พฤษภาคม) และช่วงฤดูน้ำหลาก (เดือนกันยายน-ตุลาคม) กระจายตัวในแต่ละชั้นน้ำ รวมทั้งสิ้นจำนวน 59 บ่อ และวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลทางเคมีของไอออนประจุบวก ได้แก่ โซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม และ แมกนีเซียม

และ ไอออนประจุลบ ได้แก่ คลอไรด์ ซัลเฟต ไนเตรต คาร์บอเนต และ ไบคาร์บอเนต ในพื้นที่ศึกษา ด้วย Piper trilinear diagram

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของน้ำบาดาลที่ศึกษาในงานวิจัย และวิธีการตรวจวัด/วิเคราะห์

คุณสมบัติของน้ำใต้ดิน		วิธีการตรวจวัด/วิเคราะห์
Physical	Turbidity– NTU	Turbidity meter
	Color - Pt/Co	Test Kit
Chemical	Temperature - C°	Thermometer
	pH	pH meter
	Conductivity - ms/cm	Conductivity Meter
	Total Dissolved Solids - mg/l	Gravimetric method
	Total Hardness - mg/l	Titration Methods
	Cations (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) - mg/l	ICP
	Anions (Cl^-, HCO_3^- , NO_3^-, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}, SO_4^{2-}) - mg/l	Titration (Cl^-, HCO_3^- , CO_3^{2-}) UV/VIS Spectrophotometer (PO_4^{3-}, SO_4^{2-})

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

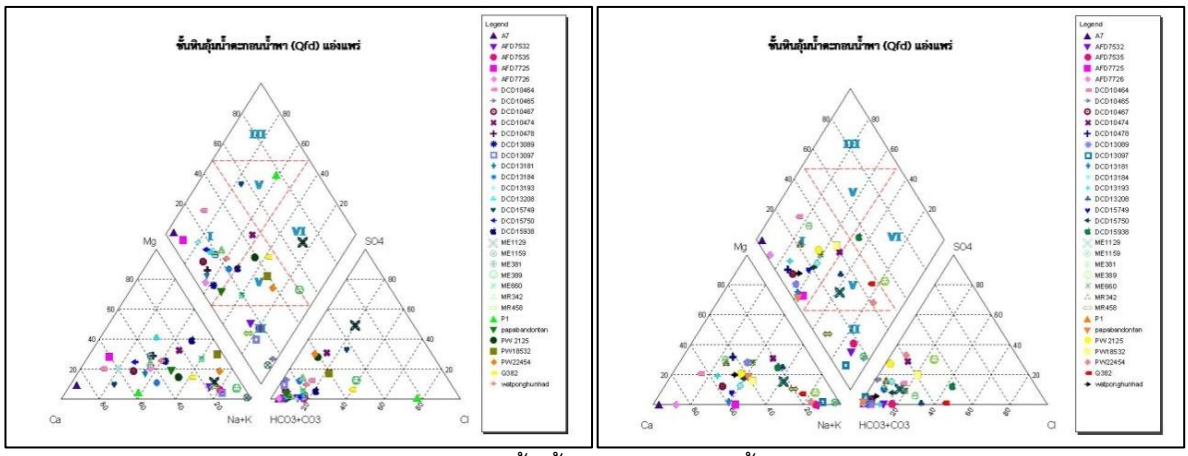
อุทกธรณีวิทยาของแอ่งน้ำบาดาลแพร่

แอ่งน้ำบาดาลแพร่ มีเนื้อที่ประมาณ 10,711 ตารางกิโลเมตรโดยส่วนที่ยาวที่สุดมีระยะทางประมาณ 354 กิโลเมตรและส่วนที่กว้างที่สุดประมาณ 80 กิโลเมตร แอ่งน้ำบาดาลแพร่ครอบคลุมพื้นที่ในจังหวัดแพร่ และพื้นที่บางส่วนในจังหวัดพะเยา น่าน และลำปาง แอ่งน้ำบาดาลแพร่ ประกอบขึ้นด้วยชั้นน้ำบาดาลหลักในหินร่วน 3 ชั้นน้ำ ได้แก่ ชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนที่ราบลุ่มน้ำหลัก/ชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนน้ำพา (Qa/Qfd) ที่วางตัวตั้งแต่ระดับผิวดินลงไปถึงระดับความลึกประมาณ 15 เมตร ชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนตะพักน้ำยุคใหม่ (Qyt) ที่วางตัวอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 25-40 เมตร และมีความหนาโดยเฉลี่ย 25 เมตร และชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนตะพักน้ำยุคเก่า (Qot) ที่วางตัวอยู่ที่ระดับความลึกมากกว่า 40 เมตร และมีความหนาสูงสุดเกินกว่า 100 เมตรส่วนใหญ่ชั้นน้ำบาดาลในหินร่วนแผ่ขยายตัวบริเวณแอ่งย่อยต่างๆ ส่วนชั้นน้ำบาดาลหลักในหินแข็งประกอบด้วยชั้นหินอุ้มน้ำหินชั้นกึ่งแปรอายุเพอร์เมียน-คาร์บอนิเฟอรัส (PCms) ชั้นหินอุ้มน้ำหินคาร์บอเนตอายุเพอร์เมียน (Pc) ชั้นหินอุ้มน้ำหินคาร์บอเนตอายุไทรแอสซิก (TRc) ชั้นหินอุ้มน้ำหินชุดลำปาง (TRlp) และชั้นหินอุ้มน้ำหินชุดโคราชตอนล่าง (TRJlk) แต่อย่างไรก็ตามในบรรดาชั้นน้ำบาดาลหลักเหล่านี้ ชั้นน้ำที่นับได้ว่ามีความสำคัญและมีการพัฒนาน้ำบาดาลขึ้นมาใช้มาก ได้แก่ ชั้นหินอุ้มน้ำตะกอนตะพักน้ำยุคเก่า (Qot) และชั้นหินอุ้มน้ำหินชุดโคราชตอนล่าง (TRJlk) (ทวีศักดิ์ , 2546)

คุณภาพน้ำบาดาลแอ่งน้ำบาดาลแพร่ช่วงฤดูแล้ง (เดือนเมษายน-พฤษภาคม) และ ช่วงฤดูน้ำหลาก (เดือนกันยายน-ตุลาคม)

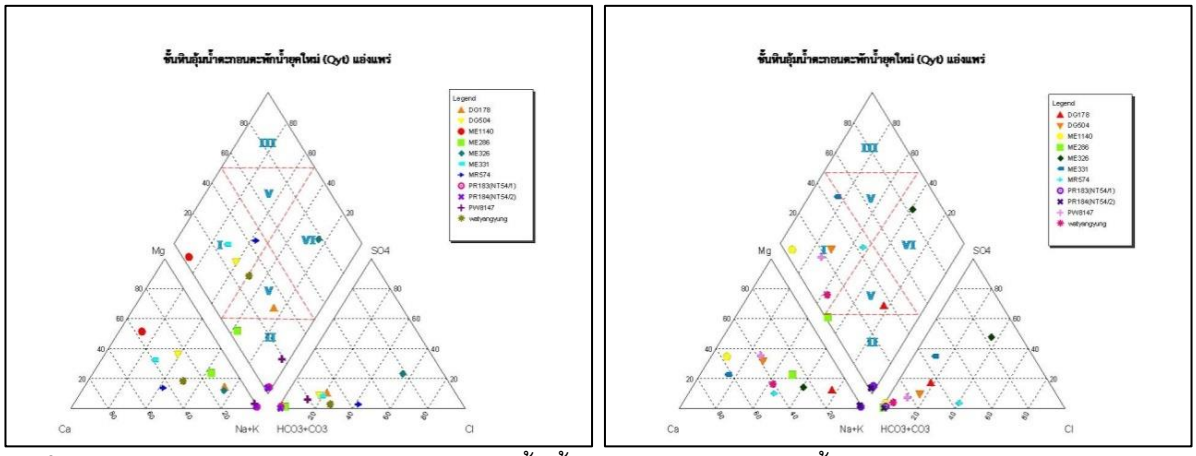
ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลที่เก็บจากบ่อน้ำบาดาลชั้นน้ำตะกอนน้ำพายุคปัจจุบัน (Qfd) ด้วย Piper trilinear diagram (รูปที่ 2) แสดงลักษณะปรากฏชนิดที่ 1 “Carbonate Hardness facies” เป็นน้ำกระด้างชั่วคราว พบบริเวณอำเภอปง อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา อำเภอบ้านหลวง จังหวัดน่าน อำเภอร้องกวาง อำเภอลอง อำเภอสูงเม่น และ อำเภอเมืองแพร่ จังหวัดแพร่ และพบว่าแสดงลักษณะปรากฏชนิดที่ 2 “Carbonate Alkali Facies” ซึ่งเป็นน้ำอ่อนคุณภาพดี พบบริเวณพื้นที่อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา อำเภอบ้านหลวง จังหวัดน่าน นอกจากนี้ยังพบแสดงลักษณะปรากฏชนิดที่ 4 “Noncarbonate Alkali Facies” เป็นน้ำ

บาดาลกร่อยหรือน้ำเค็ม พบบริเวณอำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา และ อำเภอสอง จังหวัดแพร่ ส่วนลักษณะปรากฏชนิดที่ 5 “mixing water” พบว่า mixing water อยู่คาบเกี่ยวระหว่างน้ำอ่อนและน้ำกระด้างชั่วคราว พบบริเวณอำเภอปง จังหวัดพะเยา อำเภอสอง จังหวัดแพร่ และ อำเภองาว จังหวัดลำปาง



รูปที่ 2 Hydrogeological facies ของแอ่งแพร่ ชั้นน้ำบาดาลตะกอนน้ำพายุคปัจจุบัน (Qfd) (ก)เดือนเมษายน - พฤษภาคม และ (ข)เดือน กันยายน-ตุลาคม

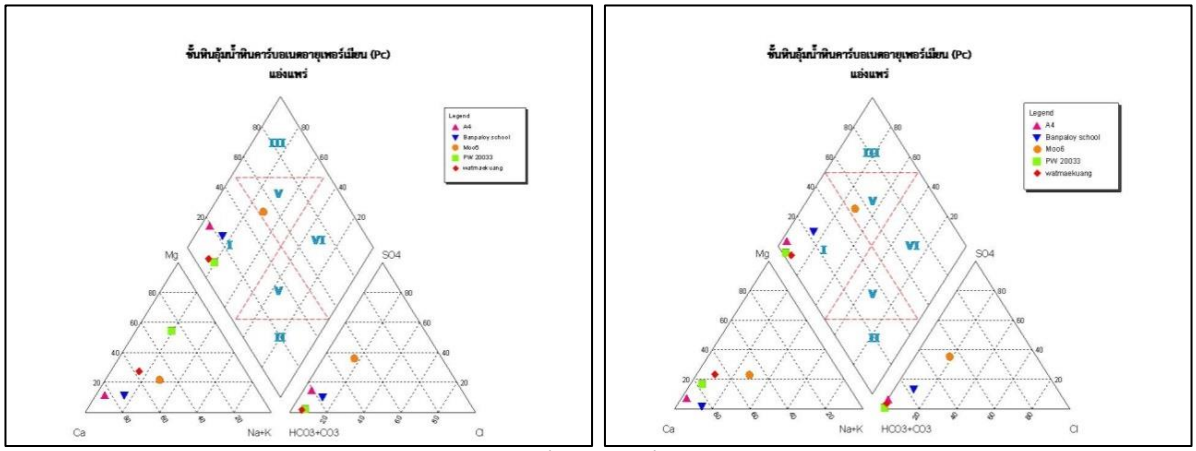
ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลที่เก็บจากบ่อน้ำบาดาลชั้นน้ำตะกอนตะพักน้ำยุคใหม่ (Qyt) ด้วย Piper trilinear diagram (รูปที่ 3) แสดงลักษณะปรากฏชนิดที่ 1 (Hydrogeochemicalfacies type “ I ”) “Carbonate Hardness facies” (Ca + Mg, HCO_3 + CO_3> 50%) ซึ่งเป็นน้ำกระด้างชั่วคราว พบบริเวณอำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา อำเภอบ้านหลวง จังหวัดน่าน อำเภอร้องกวาง และอำเภอลอง จังหวัดแพร่ และอำเภองาว จังหวัดลำปาง และพบแสดงแสดงลักษณะปรากฏชนิดที่ 2 “Carbonate Alkali Facies” ซึ่งเป็นน้ำอ่อน มีคุณภาพดี เหมาะแก่การอุปโภคบริโภค พบอยู่ในพื้นที่อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา และ อำเภอสอง จังหวัดแพร่ นอกจากนี้ยังพบลักษณะปรากฏชนิดที่ 5 (Hydrogeochemicalfacies type “ V ”) “mixing water” พบว่า mixing water อยู่คาบเกี่ยวระหว่างน้ำอ่อนและน้ำกระด้างชั่วคราว พบบริเวณอำเภอบ้านหลวง จังหวัดน่าน



รูปที่ 3 Hydrogeological facies ของแอ่งแพร่ ชั้นน้ำบาดาลตะกอนตะพักน้ำยุคใหม่ (Qyt) (ก)เดือนเมษายน - พฤษภาคม และ (ข)เดือน กันยายน-ตุลาคม

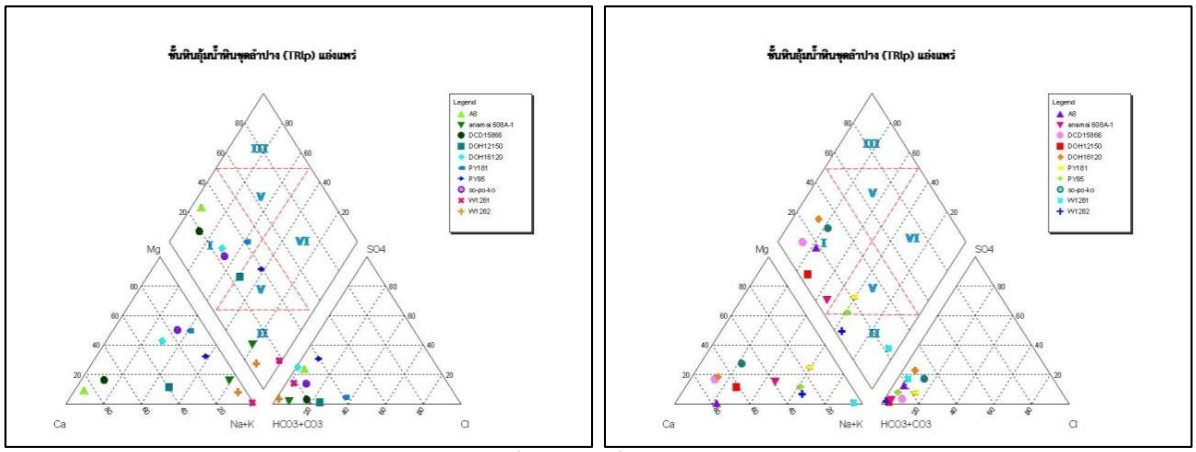
ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลที่เก็บจากบ่อน้ำบาดาลชั้นหินอุ้มน้ำคาร์บอเนตยุคเพอร์เมียน (Pc) ด้วย Piper trilinear diagram (รูปที่ 4) แสดงลักษณะปรากฏชนิดที่ 1 (Hydrogeochemicalfacies type “ I ”) “Carbonate Hardness facies” ซึ่งเป็นน้ำกระด้างชั่วคราว พบบริเวณอำเภอลอง จังหวัดแพร่ และพบแสดง

ลักษณะปรากฏชนิดที่ 5 “mixing water” or “HydrochemicalFacies type V” พบว่า mixing water อยู่คาบเกี่ยวระหว่างน้ำอ่อนและน้ำกระด้างชั่วคราว พบบริเวณอำเภอสอง และอำเภอลอง จังหวัดแพร่



รูปที่ 4 Hydrogeological facies ของแอ่งแพร่ ชั้นหินอุ้มน้ำคาร์บอเนตยุคเพอร์เมียน (Pc(ก)เดือนเมษายน - พฤษภาคม และ (ข)เดือน กันยายน-ตุลาคม

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลที่เก็บจากบ่อน้ำบาดาลชั้นหินอุ้มน้ำลำปาง (TRlp) ด้วย Piper trilinear diagram (รูปที่ 5) แสดงลักษณะปรากฏชนิดที่ 1 “Carbonate Hardness facies” ซึ่งเป็นน้ำกระด้างชั่วคราว พบบริเวณอำเภอปง จังหวัดพะเยา อำเภอบ้านหลวง จังหวัดน่าน อำเภอเด่นชัย อำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่ และยังแสดงลักษณะปรากฏชนิด 2 “Carbonate Alkali Facies” ซึ่งเป็นน้ำอ่อน มีคุณภาพดี เหมาะแก่การอุปโภคบริโภค พบอยู่ในพื้นที่อำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา และ อำเภองาว จังหวัดลำปาง นอกจากนี้ยังพบแสดงลักษณะปรากฏชนิดที่ 5 “mixing water” or “HydrochemicalFacies type V” พบว่า mixing water อยู่คาบเกี่ยวระหว่างน้ำอ่อนและน้ำกระด้างชั่วคราว พบบริเวณอำเภอปง จังหวัดพะเยา และ อำเภองาว จังหวัดลำปาง



รูปที่ 5 Hydrogeological facies ของแอ่งแพร่ ชั้นหินอุ้มน้ำลำปาง (TRlp) (ก)เดือนเมษายน - พฤษภาคม และ (ข)เดือน กันยายน-ตุลาคม

อภิปรายผลการวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำบาดาลของแต่ละชั้นน้ำบาดาลของแอ่งน้ำบาดาลแพร่ในพื้นที่ลุ่มน้ายม ช่วงฤดูแล้ง (เดือนเมษายน-พฤษภาคม) และฤดูน้ำหลาก (เดือนกันยายน-ตุลาคม) ผลการศึกษาพบว่าน้ำบาดาลมีคุณภาพคงที่ แต่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในบางจุดเท่านั้น ซึ่งบ่งชี้ถึงฤดูกาลเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำบาดาลในพื้นที่แอ่งน้ำบาดาลแพร่

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยแนะนำแนวทางในการศึกษาค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการช่วยตรวจสอบแก้ไขจุดบกพร่องในงานวิจัยนี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี.2550. **ธรณีวิทยาประเทศไทย**.กรมทรัพยากรธรณี.

ทวีศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, (2546). **น้ำบาดาล**. ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

APPHA, AWWA and WEF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th ed., American Public Health Association, Washington.

Dajun Qin a., Jeffrey V., Turner b., Zhonghe Pang. 2005. Hydrogeochemistry and groundwater circulation in the Xi'an geothermal field, China. **GEOTHERMICS** 34 : 471-494

Gi-Tak Chaea., Seong-Taek Yuna., Kangjoo Kimb and Bernhard Mayerc. 2006. Hydrogeochemistry of sodium-bicarbonate type bedrock groundwater in the Pocheon spa area, South Korea: water–rock interaction and hydrologic mixing. **Journal of Hydrology** 321 : 326-343

T.Ramkumar, S.Venkatramanan, I.Anitha Mary, M.Tamilselvi and G.Ramesh. 2010. Hydrogeologychemical Quality of Groundwater in Vedaraniyam Town, TamiNadu, India. **Environmental and Earth Sciences** 2 (1) : 44-48

ฟิสิกส์ของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าและหม้อ

Physics of induction cookers and pots

รังสรรค์ กรีกูล[1], วันดี อ่อนเรียบร้อย[1]

Rangsun Kreekoon[1], Wandee Onreabroy[1]

บทคัดย่อ

เตาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นที่นิยมในครอบครัวสมัยใหม่ เตาแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีควรมีการให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุบางประเภทของหม้อ ดังนั้นการศึกษากลไกการทำงานของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ เตาแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานโดยการสร้างสนามแม่เหล็กสลับ 25 kHz ใต้แผ่นเซรามิกส์ของเตาแม่เหล็กไฟฟ้า การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่รูปแบบหม้อและคุณสมบัติแม่เหล็กของหม้อ 6 ใบ สิ่งที่สำคัญที่สุดที่ต้องรู้คือการเหนี่ยวนำที่เป็นหลักในการให้ความร้อนโดยกระแสไหลวนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำบนพื้นผิวก้นหม้อ บทความนี้เป็นความรู้เพื่อช่วยให้ประชาชนตัดสินใจได้ถูกต้องในการเลือกเครื่องครัว เพื่อให้ประหยัดพลังงาน เวลา และเงิน

ABSTRACT

Induction cookers are popular in the modern family. The right induction cooker conducts heat quickly and efficiently depending on types of materials. Thus, the study of induction mechanism of cooker is necessary for efficiently. Induction cooker works by creating alternating magnetic field of 25 kHz beneath ceramic plate of Induction cooker. The present study focused on pot model and magnetic properties of 6 pots samples. The most important thing to know is that induction is an essential way of heating by eddy current from the induction at the bottom pot surface. This paper provides knowledge to help people make the right decision for their cookware, to save you time energy and money.

Keywords: induction cooking, eddy current, Induction, magnetic field

* Corresponding author; e-mail address: **theboydz@gmail.com**

[1]ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[1]Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

คำนำ

อุปกรณ์ไฟฟ้าในปัจจุบันเกี่ยวข้องกับหลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีหลากหลายรูปแบบ แต่อย่างหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในครัวเรือนและร้านอาหาร ก็คือเตาแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเตาแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเตาแม่เหล็กไฟฟ้า เตาแก๊ส เตาแผ่นความร้อนและเตาอบ พบว่าเตาแม่เหล็กไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ความร้อนจะเกิดที่ภาชนะและเข้าสู่อาหารโดยตรง ดังนั้นหากผู้ผลิต ผู้ใช้ และผู้ที่เกี่ยวข้องมีความรู้ในฟิสิกส์ของเตาแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำให้เข้าใจถึงหลักการทำงานของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และสามารถพัฒนาเตาแม่เหล็กไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูงและหลากหลายมากขึ้น โดยทั่วไปเตาแม่เหล็กไฟฟ้าจะออกแบบมาเพื่อใช้กับภาชนะก้นเรียบและแนบสนิทติดกับแผ่นเซรามิกส์ของหน้าเตาแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำให้ภาชนะนั้นอยู่ใกล้กับบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กมากที่สุด ภาชนะที่ใช้มักจะเป็น หม้อเหล็กเคลือบ กระทะเหล็กหล่อ หม้อเหล็ก หม้อสแตนเลส เพื่อให้สามารถเกิดกระแสไหลวน จนเป็นความร้อนที่ถ่ายโอนไปยังอาหารในภาชนะนั้นๆ ความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลวน ที่ได้จากโลหะตัวนำที่อยู่ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก เป็นกลไกหลักที่ใช้ในเตาแม่เหล็กไฟฟ้า นั่นคือการนำความร้อนที่ได้จากกระแสไหลวนไปใช้ประโยชน์ในการหุงต้ม หม้อที่ใช้สำหรับเตาแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีหลายชนิดด้วยกันส่วนใหญ่จะมีการกำกับไว้ว่าเป็นหม้อที่ใช้กับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งมีราคาแพงกว่าหม้อทั่วไป หม้อที่ออกแบบมาสำหรับเตาแม่เหล็กไฟฟ้ามักจะทำจากวัสดุหลายชั้นทำให้ก้นหม้อมีความหนา อาจส่งผลต่อความร้อนที่สูญเสียและโดยทั่วไปมักจะเข้าใจว่าหม้อที่ใช้กับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าได้นั้นต้องเป็นหม้อสแตนเลสที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ จากการทดสอบพบว่า หากเป็นหม้อสเตนเลสที่แม่เหล็กดูดไม่ติดก็สามารถใช้งานได้ ส่วนหม้ออะลูมิเนียมนั้นไม่สามารถใช้งานกับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เนื่องจากวงจรของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ได้ออกแบบให้ใช้ได้กับสแตนเลสและเหล็ก สำหรับอลูมิเนียมมีสภาพการนำไฟฟ้าที่สูงจะเกิดกระแสไหลวนสูงด้วยเช่นกัน ในวงจรจึงมีที่ตรวจจับไม่ให้กระแสในวงจรเกินกว่าที่กำหนดเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน ดังนั้นเมื่อนำหม้ออะลูมิเนียมไปวางบนเตาแม่เหล็กไฟฟ้า ชุดวงจรของเตาจะควบคุมไม่ให้เตาทำงานเพื่อป้องกันการไหม้ของวงจรและขดลวด แต่หากเป็นแผ่นอะลูมิเนียมบางๆ พบว่าเตาแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทำงานได้ ส่งผลให้แผ่นฟิล์มอลูมิเนียมร้อนและไหม้ได้ ดังนั้นชนิดวัสดุที่ใช้ในการออกแบบหม้อจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการใช้งาน

การศึกษาครั้งนี้ได้มีการทดสอบนำหม้อสแตนเลสทั่วไปที่ไม่ได้ระบุว่าสามารถใช้กับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าได้มาทดสอบกับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อศึกษาว่าหม้อสแตนเลสทั่วไปที่มีราคาถูกกว่าสามารถใช้กับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าได้หรือไม่และมีประสิทธิภาพการให้ความร้อนอย่างไรเมื่อเทียบกับหม้อที่ออกแบบมาสำหรับเตาแม่เหล็กไฟฟ้า และสมบัติทางแม่เหล็กของหม้อมีผลต่อการใช้งานอย่างไร พลังงานและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้งานของหม้อแต่ละชนิดมีผลแตกต่างกันหรือไม่ ดังนั้นในการสร้างความเข้าใจในการใช้งานเตาแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองเพื่อศึกษาฟิสิกส์ของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าและหม้อ อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง หม้อโลหะชนิดต่างๆ และเตาแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดในการทดลองดังรูปที่ 1 เครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบอัตโนมัติเพื่อใช้ในการเก็บบันทึกอุณหภูมิของน้ำในระหว่างการทดลอง (รุ่นSD200และ ยี่ห้อ EXTECH) และมีวัตต์มิเตอร์ (รุ่น3000W ยี่ห้อ WANF) สำหรับวัดพลังงานไฟฟ้าเพื่อศึกษาชนิดของหม้อที่มีต่อกำลังลังไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กใช้แม่เหล็กถาวรร่วมกับเทสลามิเตอร์ (รุ่น HT 201 ยี่ห้อ Hengtong) และมีมัลติมิเตอร์ (รุ่น Flux 189 และออสซิลโลสโคป (รุ่น TDS2014B ยี่ห้อ tektronix) ใช้วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



(a) (b) (c) (d) (e)

Figure 1 Instrument for measurement; (a) Data logger, (b) Watt meter (c) Tesla meter, (d)Multimeter And (e) Oscilloscope

หม้อโลหะที่ใช้ในการทดลอง

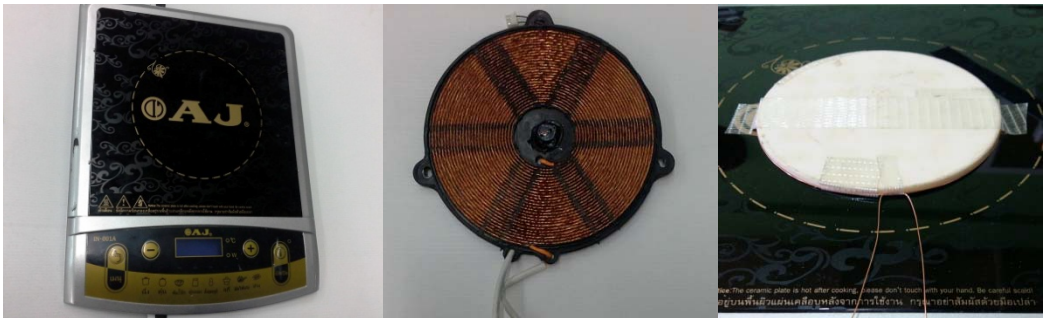
หม้อที่ใช้ในการทดลองเป็นหม้อสแตนเลส จำนวน 6 ใบ โดยที่หม้อเบอร์ 1 และ 2 เป็นสแตนเลสที่แม่เหล็กไม่ดูดติด หม้อเบอร์ 3 และ 4 เป็นหม้อที่แม่เหล็กดูดติด หรือ และ หม้อเบอร์ 5 และ 6 เป็นหม้อหลายชั้นที่ออกแบบสำหรับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าดังแสดงรูปที่ 2



Figure 2 Pot model and magnetic properties of 6 pots .

เตาแม่เหล็กไฟฟ้า

เตาแม่เหล็กไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญคือวงจรอิเล็กทรอนิกที่ทำหน้าที่สร้างกำลังไฟฟ้าความถี่สูง และขดลวดเหนี่ยวนำทำหน้าที่สร้างฟลักซ์แม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่สูงบริเวณบนผิวแผ่นเซรามิกส์หน้าเตาแม่เหล็กไฟฟ้า โดยขดลวดเหนี่ยวนำของเตาจะมีแท่งเฟอร์ไรท์ ทำหน้าที่เสริมฟลักซ์แม่เหล็กให้สูงขึ้น ดังนั้นการทำงานของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงแกนอากาศ ซึ่งขดลวดที่เตาทำหน้าที่เสมือนขดลวดปฐมภูมิ และมีหม้อโลหะทำหน้าที่เสมือนขดลวดทุติยภูมิ



(a) (b) (c)

Figure 3 (a) Induction cooker, (b) Coil of induction cooker and (c) Set of Coil for induction study

เมื่อพิจารณารูปที่ 3(a) เตาแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง กำลังไฟฟ้า 800 W - 2,000 W รุ่น IN-001A ยี่ห้อ AJ เมื่อพิจารณาขดลวดภายในเตาแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 3(b) แผ่นขดลวดเหนี่ยวนำของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยแกนเฟอร์ไรท์จำนวน 6 แท่ง ร่วมกับขดลวดเหนี่ยวนำ และรูปที่ 3 (c) แสดงลักษณะของวงขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง เพื่อศึกษาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างหม้อกับสนามแม่เหล็กความถี่สูงจากเตาแม่เหล็กไฟฟ้า

การศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของหม้อ

การศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของหม้อโลหะ ได้ศึกษาทดลองด้วยการให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับก้นหม้อ หากหม้อมีสภาพการเป็นแม่เหล็กที่ดี แมกเนติไดโพลโมเมนต์ลัพธ์ที่เกิดขึ้นในโลหะนั้นจะมีค่ามาก และจะได้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระว่างก้นหม้อและสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรสูงด้วย ในการวัดสนามแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็กถาวร วัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขั้นระหว่างแท่งแม่เหล็กและหม้อมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กได้ 159 mT เมื่อวางห่างก้นหม้อเป็นระยะห่าง 3 mm เพื่อควบคุมระยะห่าง โดยจัดให้มีที่วางแม่เหล็กบนแท่นอะคริลิก และใช้เครื่องเทสลามิเตอร์วัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นปัจจัยหนึ่งในการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและเกิดเป็นกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นที่ผิวก้นหม้อโลหะ ในการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างหม้อโลหะกับเตาแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ลวดทองแดงเบอร์ 26 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 mm มาขดเป็นวงรอบจานเซรามิกส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 cm สูง 5 mm จำนวน 1 รอบ โดยนำหม้อแต่ละเบอร์วางบนจานเซรามิกส์เพื่อควบคุมระยะให้เท่ากันในการทดสอบกับหม้อโลหะแต่ละใบ สำหรับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ กำหนดให้การทดลองนี้ใช้กับกำลังไฟฟ้า 1,500 วัตต์

การศึกษาอุณหภูมิของน้ำที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนของหม้อและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

จากกการทดลองเบื้องต้นเมื่อตั้งกำลังไฟฟ้าของแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 1,500 วัตต์ พบว่ากำลังไฟฟ้าที่เตาจ่ายให้กับวงจรไม่เท่ากันในขณะที่ใช้หม้อแต่ละชนิด จึงได้ออกแบบการศึกษาอุณหภูมิของน้ำที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนของหม้อและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของหม้อแต่ละแบบ โดยการต้มน้ำปริมาณ 500 มิลลิลิตร ด้วยกำลังไฟฟ้า 1,500 วัตต์ โดยให้หัววัดอุณหภูมิอยู่ที่จุดกึ่งกลางหม้อ และสูงจากก้นหม้อที่ ระยะ 1 cm ทำการต้มน้ำเป็นเวลา 5 นาที และใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิและและบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

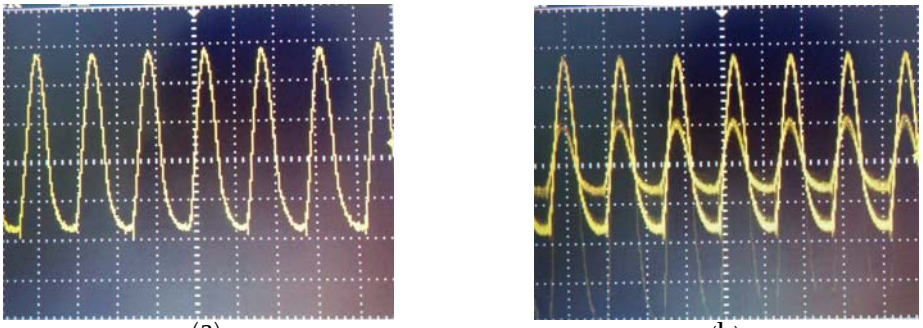
ผลการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นแม่เหล็กระหว่างหม้อกับเตาแม่เหล็กไฟฟ้า

ผลการทดลองขนาดสนามแม่เหล็กระยะห่างจากแม่เหล็กถาวร 3 mm มีค่าเฉลี่ย 159 mT (B_0) จากนั้นทำการวัดสนามแม่เหล็ก ระหว่างผิวหม้อกับแท่งแม่เหล็กโดยมีระยะระหว่างแม่เหล็กถาวรดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับหม้อใบที่ 1 พบว่าเมื่อนำค่า $\vec{B}_1$ ไปเทียบกับ $\vec{B}_0$ จะได้ $\vec{B}_T = \vec{B}_1 - \vec{B}_0$ เพื่อหาค่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่ามีค่าติดลบเล็กน้อย แสดงว่า เป็นวัสดุประเภทไดอะแมกเนติก เพราะวัสดุประเภทนี้จะสามารถผลักแม่เหล็กอ่อนๆ ซึ่งแมกเนติกไดโพลในวัสดุจะหักล้างสนามแม่เหล็กภายนอกเล็กน้อยทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าลดลงเล็กน้อย และหม้อใบที่ 2 ที่นำมาใช้เป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบของสารแม่เหล็กประเภทพาราแมกเนติก เพราะ $\vec{B}_{\mathrm{T}}$ มีค่าเป็นบวกเล็กน้อย ทำให้สนามแม่เหล็กลัพธ์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หากจะตรวจสอบยืนยันแน่นอนต้องนำโลหะที่ใช้ทำหม้อทั้ง 2 ชนิดนี้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (Vibrating Sample Magnetometer, VSM) ส่วนหม้อใบที่ 3 ถึงใบที่ 6 มีขนาดของ $\vec{B}_{\mathrm{T}}$ เป็นบวกซึ่งมีผลต่างของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนไปเฉลี่ย 83 mT แสดงว่าวัสดุที่ใช้ทำเป็นหม้อมีสภาพการแป็นแม่เหล็กที่ดี เมื่อหม้อนี้วางไว้บนเตาแม่เหล็กเหนี่ยวนำจะส่งผลให้ปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูง และวัสดุนี้มีสมบัติเป็นวัสดุแม่เหล็กประเภทเฟอโรแมกเนติกแบบชั่วคราว แสดงดังตารางที่ 1

Table 1 Magnetics properties of pots and electromagnetic induction of coil (1 turn).

Pots	Magnetic field (mT)		Electromagntic induction (V)	Input Current of Induction cooker
	$\vec{B}$ average	$\vec{B}_{\mathrm{T}}$	1 turn	(A)
Air	159.3±0.4	0.0	-	-
pot 1	158.7±0.3	-0.6	4-5	5.18
pot 2	160.3±0.2	1.0	4-5	5.24
pot3	238.9±0.2	79.6	7-8	5.29
pot 4	234.6±0.2	75.3	7-8	5.29
pot 5	247.5±0.6	88.2	7-8	5.23
pot 6	248.6±0.4	89.3	7-8	5.23

ผลการศึกษาความต่างศักย์เหนี่ยวนำระหว่างหม้อกับเตาแม่เหล็กไฟฟ้า ในการทดลองได้วัดความต่างศักย์ที่เกิดจากวงลวดจำนวน 1 รอบที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงโดยใช้เตาแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้า 1,500 วัตต์ พบว่าชนิดของหม้อที่ใช้มีผลต่อความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น โดยหม้อที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กที่สูง ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กที่สูงขึ้น จะทำให้ได้การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ที่สูง และส่งผลต่อค่าความต่างศักย์เหนี่ยวนำสูงขึ้นตามไปด้วย ตามสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้า $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(\vec{B}\cdot\vec{A})}{dt}$ พบว่าหม้อแต่ละใบมีความต่างศักย์ที่ต่างกัน หม้อที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กใกล้เคียงกันจะมีความต่างศักย์เหนี่ยวนำที่ใกล้เคียงกัน สังเกตได้ว่าข้อมูลทางด้านสนามแม่เหล็กและความต่างศักย์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกัน ดังข้อมูลเปรียบเทียบในตารางที่ 1



(a) (b)

Figure 4 Electromagnetic induction of coil on an induction cooker with pot sample (VOLT/DIV = 5 V and TIME/DIV = 25μ).

ความต่างศักย์เหนี่ยวนำที่วัดได้จากขดลวดที่อยู่ระหว่างหม้อกับเตาแม่เหล็กไฟฟ้า จากรูปที่ 4(a) เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากออสซิลโลสโคป ของหม้อเบอร์ 1 ที่มีสมบัติทางแม่เหล็กน้อยมาก ได้ค่าความต่างศักย์เหนี่ยวนำที่ได้มีแอมปลิจูดสูงสุด ในเวลาหนึ่ง ๆ ประมาณ 11.5 V โดยทั่วไปเตาแม่เหล็กไฟฟ้าจะจ่ายสนามแม่เหล็กด้วยขนาดที่ไม่คงที่ จึงทำให้มีสัญญาณไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4(b) และหม้อเบอร์ 3 ซึ่งมีสมบัติแม่เหล็กเป็นแบบเฟอร์โรแมกเนติก พบว่ามีความต่างศักย์เหนี่ยวนำที่มีแอมปลิจูดสูงสุดในเวลาหนึ่ง ๆ ประมาณ 16 V และพบว่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากออสซิลโลสโคปมีความถี่อยู่ในช่วง 25 kHz สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากออสซิลโลสโคปนี้เป็นการแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กที่เตาแม่เหล็กไฟฟ้าผลิตให้กับหม้อโลหะเป็นสนามแม่เหล็กสลับที่มีความถี่ 25 kHz

ผลการศึกษาอุณหภูมิของน้ำที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนของหม้อและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้

การศึกษาอุณหภูมิของน้ำที่เวลาทุกๆ 10 วินาที จากการทดลองวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิอัตโนมัติ ในการต้มน้ำจากอุณหภูมิห้อง (24.5 °C) ถึง 100 °C โดยใช้กำลังไฟที่ 1,500 วัตต์ ใช้เวลาในการต้มน้ำ 300 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 5

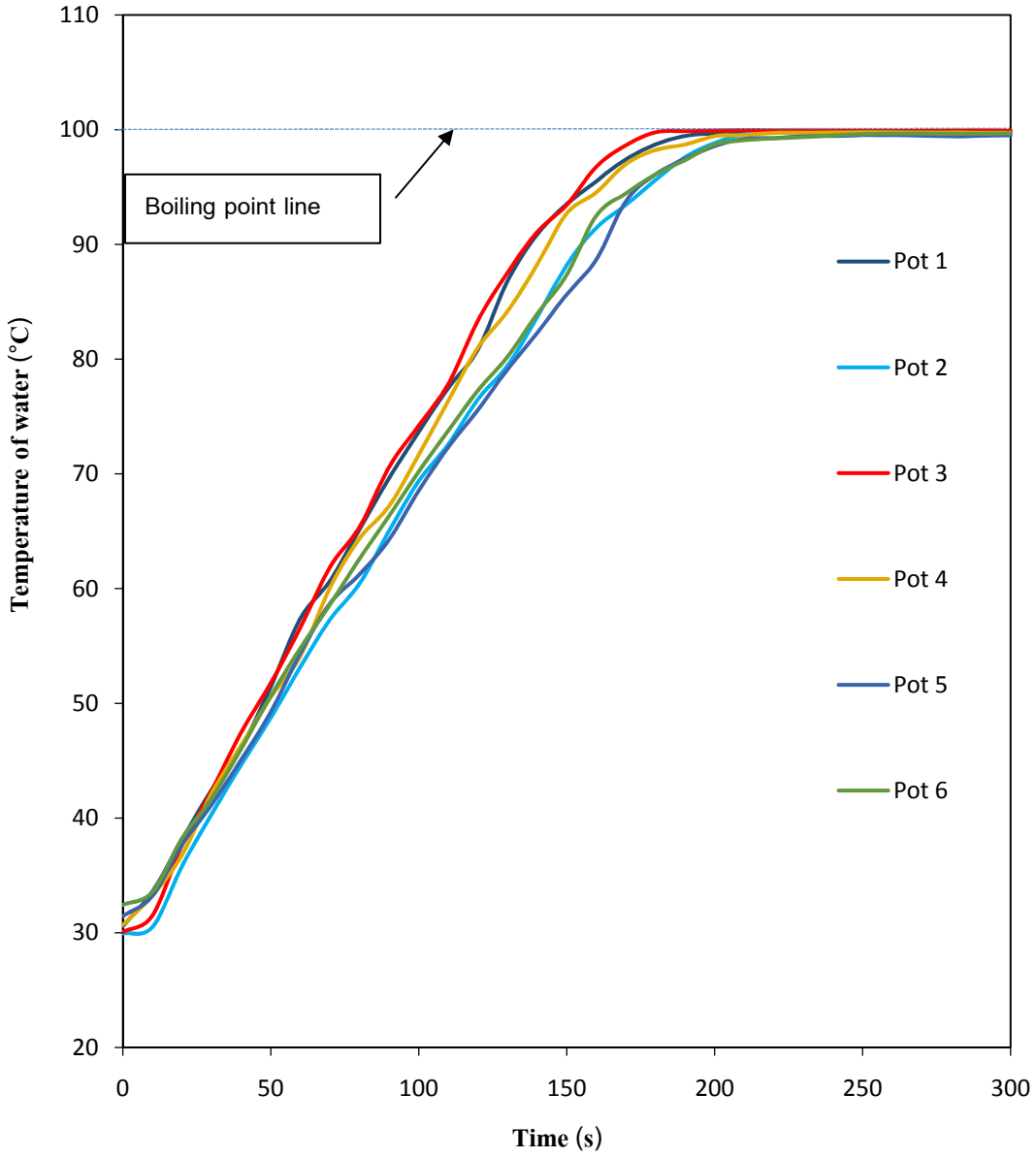


Figure 5 The relationship between temperature and time.

รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำกับเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ 500มิลลิลิตร ด้วยเตาแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าหม้อทุกใบสามารถต้มน้ำให้เดือดได้เร็วโดยใช้เวลาประมาณ 200 วินาที มีความรวดเร็วในการต้มน้ำ สำหรับหม้อเบอร์ 1, 3 และ 4 จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เร็วกว่าหม้อใบอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่าหม้อที่ถูกออกแบบมาขายในท้องตลาดมีราคาประมาณ 1,000 บาทมีความสามารถในการให้ความร้อนได้ไม่ดีเท่าหม้อสเตนเลสทั่วไป ส่วนหม้อใบที่ 1 มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่น้อยมากแต่แสดงความสามารถในการให้ความร้อนที่ใกล้เคียงกับหม้อเบอร์ 3 ซึ่งมีสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก หากพิจารณาการต้มน้ำในช่วงอุณหภูมิประมาณ 90°C และเพิ่มปริมาณน้ำเป็น 1000 มิลลิลิตร เพื่อลดการระเหยของน้ำพบว่าหม้อแต่ละแบบใช้พลังงานที่แตกต่างกันโดยหม้อเบอร์ 1 2 3 4 5 และ 6 ใช้พลังงาน 339.5, 362.9, 325.1, 327.2, 367.9และ 368.9 กิโลจูล ตามลำดับและเตาแม่เหล็กไฟฟ้าใช้กระแสไฟฟ้า 5.18, 5.24, 5.29, 5.29, 5.23 และ 5.23 A ตามลำดับ นั่นแสดงให้เห็นว่าหม้อบางชนิดถึงจะออกแบบมาเพื่อใช้กับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีราคาแพง ไม่ได้มีสามารถในการให้ความร้อนดีเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคและผู้ผลิตเข้าใจผิด

สรุปผลการทดลอง

ความรู้และความเข้าใจในฟิสิกส์ของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเลือกใช้ภาชนะที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ ในการทดลองพบว่าเตาแม่เหล็กไฟฟ้ามีความถี่สนามแม่เหล็กสลับ 25 kHz ในการเลือกชนิดของวัสดุของหม้อที่เป็นสเตนเลสทั้งที่เป็นหม้อที่เป็นโลหะสเตนเลสเกรด 430 ซึ่งเป็นประเภทที่ออกแรงดูดอย่างแรงกับแม่เหล็กและสเตนเลสเกรด 304 ที่สภาพความเป็นแม่เหล็กที่น้อยมาก ๆ พบว่าสามารถทำงานกับเตาแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีใกล้เคียงกัน หากต้องการประหยัดพลังงานควรเป็นหม้อที่ก้นกว้างผิวเรียบ ไม่หนาเกินไป เมื่อตั้งกำลังไฟฟ้าของเตาแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ที่ 1500 W พบว่าหม้อแต่ละใบใช้พลังงานไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันซึ่งขึ้นกับชนิดของหม้อและพบว่าหม้อเบอร์ 3 เป็นโลหะสเตนเลสเกรด 430 ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดและใช้เวลาในการต้มน้อยที่สุด สำหรับหม้อที่ออกแบบวางขายในท้องตลาดสำหรับเตาแม่เหล็กไฟฟ้ามีความหนาของก้นมาก และมีราคาที่สูงกว่าหม้อทั่วๆ ไป ผลการทดลองพบว่าไม่ได้ช่วยประหยัดพลังงาน และยังใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากกว่าหม้อสเตนเลสทั่วไป แต่หากมีการออกแบบวัสดุที่ก้นหม้อที่เหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้ จากการสังเกตการทดลองปัจจัยที่น่าจะส่งผลเพิ่มเติม คือสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการการเกิดความร้อนจากกระแสไหลวนควรทำการศึกษาเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้สนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุนที่ได้รับการจัดสรรจากรัฐ และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จีระศักดิ์ วงศา. 2555. เตาหุงต้มเหนี่ยวนำความร้อนแบบสวิตซ์เดี่ยวควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC. **การประชุมวิชาการระดับชาติ เบญจมิตรวิชาการ ครั้งที่** 2. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธนบุรี

Jordan, A., Wust, P., Fähling, H., John, W., Hinz, A., & Felix, R. (2009). Inductive heating of ferrimagnetic particles and magnetic fluids: physical evaluation of their potential for hyperthermia. *International Journal of Hyperthermia*, *25*(7), 499-511.

Lasobras, J., Alonso, R., Carretero, C., Carretero, E., & Imaz, E. (2014). Infrared sensor-based temperature control for domestic induction cooktops.Sensors, 14(3), 5278-5295.

Liu, Z. (2014). High Frequency Inverter Power Stage Design Considerations for Non-Magnetic Materials Induction Cooking.

Lucia, O., Acero, J., Carretero, C., & Burdio, J. M. (2013). Induction heating appliances: Toward more flexible cooking surfaces. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, *7*(3), 35-47.

Manev, A. M. (2013). Design of Induction Cooker for All Types of Metal (Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology).

การผลิตและการศึกษาคุณสมบัติของโมโนโคลนอลแอนติบอดีที่มีความจำเพาะต่อ *Campylobacter jejuni*

Production and characterization of monoclonal antibody specific to *Campylobacter jejuni*

วรกนก กนกลดารมย์[1*] ประเวทย์ ตุ้ยเต็มวงศ์[2] ชัยวัฒน์ กิตติกุล[1] และ ฆรณี ตุ้ยเต็มวงศ์[1]

Worakanog Kanogradarom[1*], Pravate Tuitemwong[2], Chaivat Kittigul[1] and Kooranee Tuitemwong[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตโมโนโคลนอลแอนติบอดีที่มีความจำเพาะ และความไวสูงต่อ *Campylobacter jejuni* โดยการฉีดกระตุ้นหนู BALB/c ด้วยเชื้อ *C. jejuni* ATCC 33291 จำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำเซลล์ม้ามของหนูมาหลอมรวมกับเซลล์มัยอิโลมา Sp2/0 คัดเลือกไฮบริโดมาที่สร้างแอนติบอดีที่จำเพาะต่อ *C. jejuni* ATCC 33291 ด้วยเทคนิค Indirect ELISA โดยพบเซลล์ไฮบริโดมา 3 โคลน คือ 3C5, 2A4 และ 4D2 ซึ่งมีค่า Optical density เท่ากับ 1.707, 1.613 และ 1.646 ตามลำดับ ผลทดสอบด้วยเทคนิค Western Blot พบว่าโมโนโคลนอลแอนติบอดี 3C5 สามารถจับกับโปรตีนของ *C. jejuni* ATCC 33291 น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10-17 kDa, 46-70 kDa และ 80-175 kDa โดยไม่ทำปฏิกิริยาต่อแบคทีเรียชนิดอื่นที่ใช้ทดสอบ คือ *C. jejuni* KGA12-7(1), *C. coli* NCTC 11353, *Salmonella* Typhi DMST 5784, *Escherichia coli* ATCC 33218 และ *Vibrio cholerae* แสดงว่าโนโคลนอลแอนติบอดี 3C5 มีความจำเพาะสูงต่อ *C. jejuni* (*C. jejuni* ATCC 33291)

ABSTRACT

The aim of this study was to produce highly specific and sensitive monoclonal antibody (mAb) for *Campylobacter jejuni.* BALB/c mice were immunized with whole cells *C. jejuni* ATCC 33291. Injections were delivered on days 0, 14 and 28. Splenocytes were isolated from the immunized mice and fused with myeloma cells (Sp2/0). Indirect ELISA was used for primary selections step of hybridomas. This study found that 3C5, 2A4 and 4D2 hybridomas clones had high specificity and sensitivity to *C. jejuni* ATCC 33291 at optical density (O.D.) of 1.707, 1.613 and 1.646 respectively. Western blot results showed that 3C5 mAb can bind to *C. jejuni* ATCC 33291 protein molecular weight (Mw) approximately 10-17 kDa, 6-70 kDa and 80-175 kDa. However, the 3C5 mAb did not bind to *C. jejuni* KGA12-7(1), *C. coli* NCTC 11353, *Salmonella* Typhi DMST 5784, *Escherichia coli* ATCC 33218 and *Vibrio cholerae*. Our finding indicated that the 3C5 mAb high specificity to *Campylobacter jejuni* ATCC 33291, but not other bacteria.

Key Words: *Campylobacter jejuni*, Monoclonal antibody, Somatic hybridization

*Corresponding author; e-mail address: W.kanogradarom@gmail.com

[1]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Microbiology, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[2]Department of Microbiology, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

คำนำ

อุตสาหกรรมส่งออกผลิตภัณฑ์จากไก่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจโดยรวมในประเทศไทยเป็นอย่างมาก ทั้งนี้การส่งออกผลิตภัณฑ์จากไก่ยังติดอยู่ในกลุ่ม 10 อันดับแรกของสินค้าทางการเกษตร และผลิตภัณฑ์ส่งออกที่สำคัญของไทย ซึ่งในการส่งออกสินค้ามักจะมีเกณฑ์มาตรฐานด้านจุลชีววิทยาของสินค้าปศุสัตว์เพื่อการส่งออก โดยในส่วนของเนื้อสัตว์แช่เย็น และแช่แข็ง (ประกาศกรมปศุสัตว์, 2551) ครอบคลุมจุลินทรีย์หลายกลุ่มรวมถึงเชื้อ *Campylobacter jejuni* และ *Campylobacter coli* ด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าเชื้อ *C. jejuni* เป็นหนึ่งในมาตรฐานด้านจุลชีววิทยาของสินค้าส่งออกที่ต้องมีการเฝ้าระวัง เนื่องจากเชื้อกลุ่ม *Campylobacter* spp. เป็นแบคทีเรียแกรมลบ และเป็นหนึ่งในเชื้อจุลินทรีย์ประจำถิ่นที่อาศัยอยู่ร่วมกันกับสัตว์ ซึ่งมีถิ่นที่อยู่อาศัยบริเวณเยื่อเมือกผนังลำไส้ของกลุ่มสัตว์ปีก (ปริชาติ และคณะ, 2552) โดยไม่ก่อให้เกิดโรคในสัตว์วัยเจริญพันธุ์ (Barry, 2008) มักพบว่ามีการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์จากเนื้อไก่ (ณัฏฐา และคณะ, 2552) และเป็นสาเหตุหลักในการก่อโรคอุจจาระร่วงเฉียบพลัน หรือโรค Campylobacteriosis (Skirrow, 1994) ของคนในประเทศกลุ่มอุตสาหกรรม โดยโรคนี้เกิดจากการบริโภคเนื้อไก่ที่มีการปนเปื้อนของเชื้อ และไม่ผ่านการปรุงให้สุกด้วยความร้อน ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงว่าเกิดการปนเปื้อนในระหว่างการฆ่าชำแหละ และแปรรูป (Jacops *et al*., 1995)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตโมโนโคลนอลแอนติบอดีจากเชื้อ *C. jejuni* ATCC 33291 เพื่อให้ได้โมโนโคลนอลแอนติบอดีที่มีความไว และจำเพาะต่อเชื้อ *C. jejuni* สำหรับนำไปพัฒนาเป็นชุดทดสอบรวดเร็วสำหรับตรวจจับเชื้อ *C. jejuni* ในประเทศไทยในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

การผลิตโมโนโคลนอลแอนติบอดี

ฉีดกระตุ้นภูมิคุ้มกันในหนู BALB/c 3 ตัว เพศเมีย อายุ 8 สัปดาห์ ด้วย Whole cell ของเชื้อ *C. jejuni* ATCC 33291 โดยเจือจางให้ได้ประมาณ 10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ใน Phosphate buffer saline (PBS) 0.1 มิลลิลิตร ที่มี 4% ฟอร์มาลีนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ผสมกับ Incomplete Freund's Adjuvant อัตราส่วน 1:1 ฉีดในวันที่ 0, 14 และ 28 เข้าบริเวณช่องท้อง และใต้ผิวหนัง เก็บเลือดจากบริเวณหางหนูสำหรับวัดระดับแอนติบอดีด้วยวิธี Indirect ELISA หนูตัวที่แสดงการตอบสนองภูมิคุ้มกันดีที่สุดต่อ *C. jejuni* ATCC 33291 จะถูกฉีดช่องท้องอีกครั้งด้วย Whole cell ของเชื้อ *C. jejuni* ATCC 33291 ประมาณ 10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ใน PBS 0.1 มิลลิลิตร ที่มี 4% ฟอร์มาลีนเป็นเวลา 3 วันก่อนการทำ Cell fusion โดยแยกเซลล์ม้ามของหนูทดลองมาหลอมรวมเข้ากับเซลล์มัยอิโลมา Sp2/0 ตามวิธีของ Kohler และ Milstein (1975) ทำการเพาะเลี้ยงใน Hypoxanthine-aminopterin-thymidine (HAT) – dulbecco's modified eagle's medium (DMEM) ที่มี 10% Fetal bovine serum (FBS) จากนั้นคัดเลือกไฮบริโดมาที่สร้างโมโนโคลนอลแอนติบอดีที่ต้องการมาทำ Cell cloning โดยวิธี Limiting dilution ก่อนเพิ่มจำนวนเซลล์เพื่อผลิตโมโนโคลนอลแอนติบอดีให้มากพอทำการทดสอบต่อไป เซลล์ส่วนหนึ่งจะถูกเก็บไว้ในถังไนโตรเจนเหลวเพื่อเก็บไว้ศึกษาในระยะเวลานาน

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Indirect enzyme-linked immunosorbent assay (indirect ELISA)

เคลือบหลุม ELISA ด้วยเชื้อ *Campylobacter jejuni* KGA12-7(1), *Campylobacter jejuni* ATCC 33291, *Campylobacter coli* NCTC 11353, *Salmonella* Typhi DMST 5784, *Escherichia coli* ATCC

33218 และ *Vibrio cholerae* ปริมาณ 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรใน Bicarbonate buffer (Coating buffer) pH 9.6 โดยใช้ปริมาณ 100 ไมโครลิตรต่อหลุม แล้วจึงบ่มข้ามคืนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ล้างแต่ละหลุมด้วย 0.05% Tween 20 phosphate buffer saline (PBS-T) รวม 3 ครั้ง แล้วบล๊อคด้วย 1% Skimmed milk ใน PBS-T เป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ 37 องศาเซลเซียส ล้างด้วย PBS-T 3 ครั้ง แล้วเติม Hybridoma cell culture fluid ปริมาณ 100 ไมโครลิตรต่อหลุม บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นล้างอีกด้วย PBS-T 3 ครั้ง และเติม Goat anti-mouse horseradish-peroxidase conjugated immunoglobulins (เจือจาง 1/2000) 100 ไมโครลิตรต่อหลุม บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ล้างอีกครั้งด้วย PBS-T 3 ครั้ง และเติมสับสเตรต 3,3′,5,5′-Tetramethylbenzidine (TMB) บ่ม 30 นาทีหรือจนกว่าจะเกิดสีในอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงเติม Stop solution แล้วนำไปอ่านค่า Optical density ที่ 450 นาโนเมตร (OD_{450}) ด้วยเครื่อง Microplate spectrophotometer (Qian *et al.,* 2008)

การตรวจหาความจำเพาะของโมโนโคลนอลแอนติบอดีด้วยวิธี Western-blotting

แยกโปรตีนของแบคทีเรีย 6 ชนิดด้วยวิธี Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) โดยใช้ 12% Polyacrylamide separating gel ตามวิธีของ Laemmli (1970) จากนั้นย้ายโปรตีนไปที่ไนโตรเซลลูโลสเมมเบรนแล้วทำปฏิกิริยากับโมโนโคลนอลแอนติบอดีที่ต้องการทดสอบ และ Goat anti-mouse horseradish-peroxidase conjugated immunoglobulins (เจือจาง 1/1000) แล้วตรวจดูด้วยสารละลาย TMB blotting ตามวิธีของ Burnette (1981) สังเกตการเกิดสีที่เกิดขึ้นบนไนโตรเซลลูโลสเมมเบรน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การผลิตโมโนโคลนอลแอนติบอดี

ในการผลิตโมโนโคลนอลแอนติบอดีโดยการฉีดกระตุ้นภูมิคุ้มกันในหนูทดลองด้วย *C. jejuni* ATCC 33291 พบว่าได้เซลล์ไฮบริโดมา 54 โคลน เมื่อนำทั้ง 54 โคลนมาเลี้ยง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ามีเพียง 13 โคลนที่เมื่อนำออกมาจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส เซลล์สามารถอยู่รอด และเพิ่มจำนวนได้คือ 1B8, 1D4, 1F5, 2A4, 2A8, 2B9, 2C7, 2D7, 2G8, 3C5, 3F11, 4D2 และ 4G3 แต่มีเพียง 7 โคลนที่สามารถเพิ่มจำนวนได้รวดเร็วคือ 2A4, 2A8, 2D7, 3C5, 3F11, 4D2 และ 4G3 แล้วเพาะเลี้ยงเพื่อเพิ่มจำนวนเซลล์เพื่อผลิตโมโนโคลนอลแอนติบอดีปริมาณมากพอนำไปทดสอบความจำเพาะในการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไป

ความจำเพาะของโมโนโคลนอลแอนติบอดีที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Indirect enzyme-linked immunosorbent assay (Indirect ELISA)

ทดสอบความจำเพาะของโมโนโคลนอลแอนติบอดีทั้ง 7 รหัสต่อจุลินทรีย์ 6 ชนิด ได้แก่ *C. jejuni* KGA12-7(1), *C. jejuni* ATCC 33291, *C. coli* NCTC 11353, *S.* Typhi DMST 5784, *E. coli* ATCC 33218 และ *V. cholerae* ด้วยเทคนิค Indirect enzyme-linked immunosorbent assay (Indirect ELISA) โดยทำ 2 ซ้ำ ได้ผลแสดงใน (Figure 1)

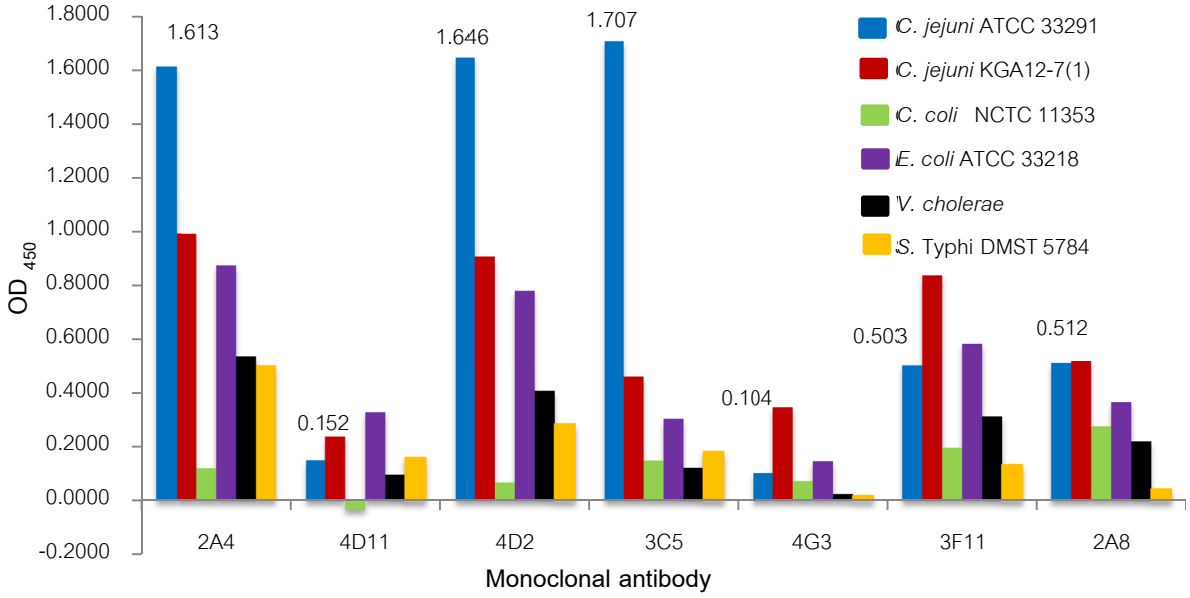


Figure 1 Reactions of monoclonal antibodies and various types of antigens tested.

จากภาพที่ 1 พบว่าโมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 มีความน่าสนใจในการนำไปศึกษาต่อสูงสุด เนื่องจากมีความจำเพาะต่อเชื้อ *C. jejuni* ATCC 33291 ซึ่งเป็นตัวที่ฉีดกระตุ้นมากที่สุด โดยมี OD_{450} เท่ากับ 1.707 โดยทำปฏิกิริยาบ้างกับเชื้อ *C. jejuni* KGA12-7(1) ที่แยกจากโรงงานมี OD_{450} เท่ากับ 0.462 เชื้อ *E. coli* ATCC 33218, *S.* Typhi DMST 5784, *V. cholerae* และ *C. coli* NCTC 11353 มี OD_{450} เท่ากับ 0.304, 0.182, 0.124 และ 0.150 ตามลำดับ ซึ่งทำให้โมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุด

โมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 2A4 และ 4D2 มีความน่าสนใจในการนำไปศึกษาต่อรองลงมาจากรหัส 3C5 เนื่องจากความจำเพาะต่อเชื้อ *C. jejuni* ATCC 33291 ซึ่งเป็นตัวที่ฉีดกระตุ้นสูง โดย OD_{450} เท่ากับ 1.613 และ 1.646 ตามลำดับ ความจำเพาะต่อเชื้อ *C. jejuni* KGA12-7(1) มี OD_{450} เท่ากับ 0.992 และ 0.909 ตามลำดับ แต่โมโนโคลนอลแอนติบอดีทั้งสองรหัสพบว่าเกิดปฏิกิริยาข้ามกลุ่มต่อเชื้อ *E. coli* ATCC 33218 มี OD_{450} เท่ากับ 0.876 และ 0.783 ตามลำดับ ตามด้วย *V. cholerae* มี OD_{450} เท่ากับ 0.540 และ 0.409 ตามลำดับ เชื้อ *S.* Typhi DMST 5784 มี OD_{450} เท่ากับ 0.504 และ 0.284 ตามลำดับ สุดท้ายคือ *C. coli* NCTC 11353 มี OD_{450} เท่ากับ 0.122 และ 0.068 ตามลำดับ ซึ่งปฏิกิริยาข้ามกลุ่มที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการสำหรับการนำไปใช้งานในอนาคต เนื่องจากใช้ Whole cells ในการฉีดกระตุ้นจึงทำให้มีโอกาสในการเกิดโมโนโคลนอลแอนติบอดีที่จำเพาะต่อ *Campylobacter* sp. ต่ำ ซึ่งแตกต่างจากผลงานวิจัยของ Newell (1985) ซึ่งใช้แฟกเจลล่าในการกระตุ้นหนูทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาข้ามต่อเชื้อสายพันธุ์อื่น แต่เกิดปฏิกิริยาข้ามในกลุ่ม *Campylobacter* sp.เท่านั้น

โมโนโคลนอลแอนติบอดีอีก 4 รหัสที่เหลือคือ 3F11, 2A8, 4G3 และ 4D11 หลังจากทดสอบความจำเพาะของโมโนโคลนอลแอนติบอดีพบว่ามีความจำเพาะต่อ *C. jejuni* ATCC 33291 ระดับที่ต่ำมี OD_{450} เท่ากับ 0.503, 0.512, 0.104 และ 0.152 ตามลำดับ ทั้งยังเกิดปฏิกิริยาข้ามต่อเชื้อสายพันธุ์อื่นจึงไม่เหมาะสำหรับการนำไปศึกษาต่อ

ความไวของโมโนโคลนอลแอนติบอดีที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Indirect ELISA

เมื่อเลือกโมโนโคลนอลแอนติบอดีมา 3 รหัส คือ 3C5, 2A4 และ 4D2 เพื่อทดสอบความไวในการทำปฏิกิริยากับ *C. jejuni* ATCC 33291 ที่ฉีดกระตุ้นให้หนูทดลอง ด้วยการเจือจางแอนติเจนแบบ 2-fold dilution โดยเริ่มจาก 23 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วตรวจสอบด้วยวิธี Indirect ELISA เทียบกับค่า Cut off โดยทำ 2 ซ้ำ ได้ผลแสดงใน (Figure 2)

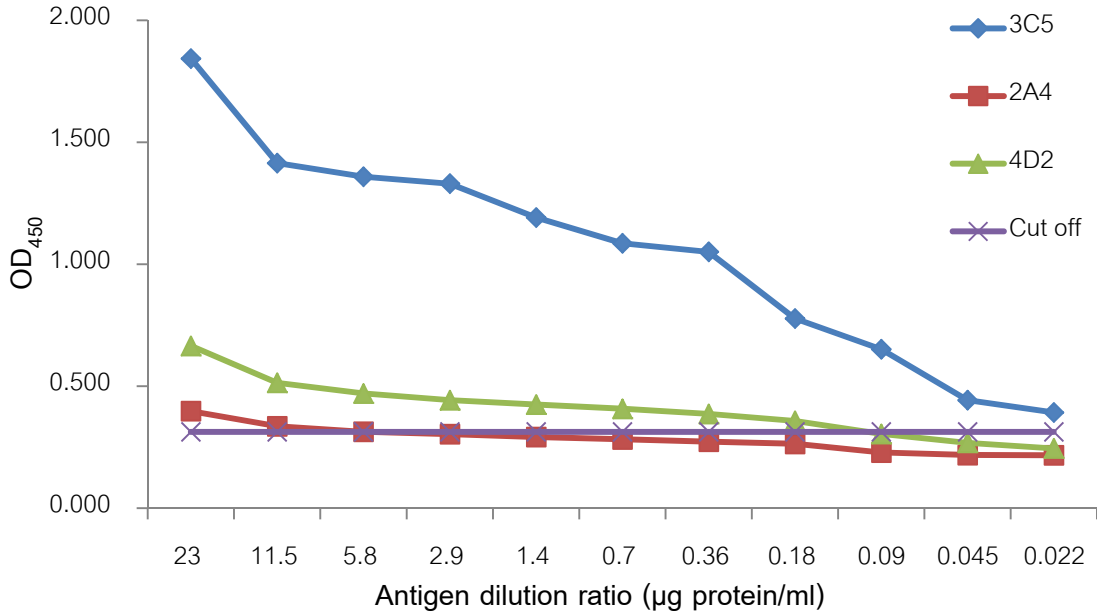


Figure 2 The sensitivity of monoclonal antibodies (3C5, 2A4 and 4D2) with serially diluted antigens.

จากภาพที่ 2 แสดงผลการทดสอบความไวของโมโนโคลนอลแอนติบอดี 3 รหัส โดยเทียบกับ Cut off (สองเท่าของ Blank = 0.312) หากผลการทดสอบเกินค่า Cut off แสดงว่ามีความไวเป็นบวก พบว่ารหัส 2A4 มีค่าความไวต่ำที่สุดโดยสามารถตรวจหา *C. jejuni* ATCC 33291 ได้ถึงปริมาณโปรตีนเท่ากับ 5.8 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยมีค่า OD_{450} เท่ากับ 0.313 โมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 4D2 มีค่าความไวสูงกว่ารหัส 2A4 โดยสามารถตรวจหา *C. jejuni* ATCC 33291 ได้ถึงปริมาณโปรตีนเท่ากับ 0.18 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่า OD_{450} เท่ากับ 0.358 และโมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 มีค่าความไวสูงสุดโดยสามารถตรวจหา *C. jejuni* ATCC 33291 ได้ถึงปริมาณโปรตีนที่ 0.022 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร หรือที่ 22 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่า OD_{450} เท่ากับ 0.392

การทดสอบความจำเพาะของโมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 ด้วยเทคนิค Western Blot

ผลการทดสอบความจำเพาะของโมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 ด้วยวิธี Western blot กับแอนติเจนจากแบคทีเรียทั้ง 6 ชนิดคือ *C. jejuni* KGA12-7(1), *C. jejuni* ATCC 33291, *C. coli* NCTC 11353, *S.* Typhi DMST 5784, *E. coli* ATCC 33218 และ *V. cholerae* ให้ผลแสดงใน (Figure 3)

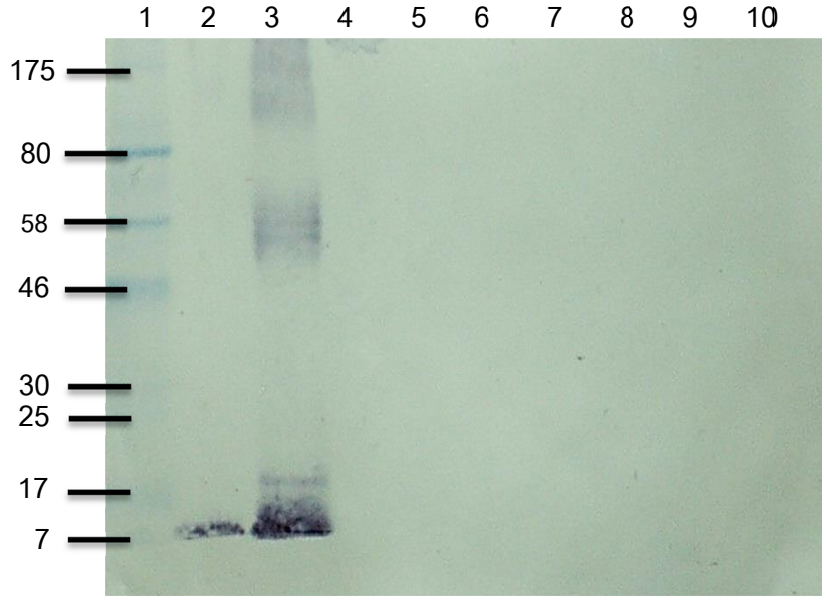


Figure 3 Western Blot of 3C5 mAb lane 1: Marker Protein, lane 2: *C. jejuni* ATCC33291 23 µg/ml, lane 3: *C. jejuni* ATCC 33291 95 µg/ml, lane 4: *C. jejuni* KGA12-7(1) 95 µg/ml, lane 5: *C. coli* NCTC11353 95 µg/ml, lane 6: *V. cholerae* 95 µg/ml, lane 7: *E. coli* ATCC 33218 95 µg/ml and lane 8: *S.* Typhi DMST 5784 95 µg/ml

จากภาพที่ 3 พบว่าโมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 นั้นเกิดปฏิกิริยาต่อแอนติเจน *C. jejuni* ATCC 33291 ที่ใช้ฉีดกระตุ้นในแถวที่ 2 และ 3 โดยไม่ทำปฏิกิริยาต่อแบคทีเรียตัวอื่นที่ใช้ทดสอบ จะเห็นว่าแถบมีความเข้มเมื่อเทียบกับโปรตีนมาตรฐานแถวที่ 1 พบว่าเกิดปฏิกิริยาของโมโนโคลนอลแอนติบอดีต่อแอนติเจนบริเวณประมาณ 10-17 kDa โดย Karen (2007) ได้ศึกษาพบว่าบริเวณ 7-17 kDa เป็น Lipooligosaccharide (LOS), 46-70 kDa ซึ่งคาดว่าเป็นบริเวณ Outer membrane protein (OMP) จากรายงานของ Newell *et al.* (1983) ที่ศึกษาบริเวณ OMP และแฟลกเจลล่าของ *C. jejuni* รวมถึงมีงานวิจัยของ Moser และคณะ (1997) ที่ศึกษาพบว่าบริเวณ 59 kDa เป็น Major outer membrane protein, 80-175 kDa และคาดว่าบริเวณ 62 และ 87 kDa เป็นแฟลกเจลล่าโปรตีน โดยที่ โปรตีนขนาด 62 kDa เป็นโปรตีนส่วนใหญ่ของแฟลกเจลล่า และโปรตีนขนาด 87 kDa เป็นโปรตีนส่วนน้อยของแฟลกเจลล่า (Newell *et al*., 1983) จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 สามารถจับแอนติเจนแบบที่เสียสภาพธรรมชาติ (Denatured) ในการทดสอบด้วยวิธี SDS-PAGE และ Western blot และแบบที่ไม่เสียสภาพธรรมชาติ (Non-denatured) ในการทดสอบด้วยวิธี Indirect ELISA ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Qian *et al.* (2008) ที่ผลิตโมโนโคลนอลแอนติบอดีซึ่งสามารถจับหลายบริเวณ แต่แถบที่สำคัญคือ 43 kDa ที่ตรงกับ Major outer membrane protein (MOMP) ของ *C. coli* RM 2228 และยังสามารถจับได้กับแอนติเจนที่เสียสภาพจากความร้อน และ SDS-PAGE เช่นกัน

สรุป

สามารถผลิตโมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 ซึ่งมีความจำเพาะ และมีความไวต่อ *C. jejuni* ATCC 33291 มากที่สุด เมื่อทดสอบด้วยวิธี Indirect ELISA และ Western blot โดยสามารถจับกับโปรตีนน้ำหนัก

โมเลกุลประมาณ 10-17 kDa, 46-70 kDa ซึ่งคาดว่าเป็นบริเวณ Outer membrane protein และ เป็น Lipooligosaccharide (LOS) ทั้งยังจับกับโปรตีนน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 80-175 kDa ซึ่งคาดว่าโปรตีนน้ำหนักโมเลกุล 62 และ 87 kDa เป็นโปรตีนส่วนที่เป็นแฟลกเจลล่า ผลจากการทดสอบหาความไว พบว่าโมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 สามารถตรวจหา *C. jejuni* ATCC 33291 ได้ในปริมาณโปรตีนน้อยกว่า 22 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ดังนั้นโมโนโคลนอลแอนติบอดีรหัส 3C5 จึงเหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาเป็นชุดทดสอบสำหรับตรวจจับ *C. jejuni* ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กรมปศุสัตว์. 2551. **ประกาศกรมปศุสัตว์ เรื่อง เกณฑ์ด้านจุลชีววิทยาของสินค้าปศุสัตว์เพื่อการส่งออก**. 30 ธันวาคม 2551.

ณัฏฐา ตระกูลสุนทรชัย, บุญช่วย เอี่ยมโภคลาภ, เสกสรรค์ สโมสรสุข, Shinji Yamasaki และ วรดา สโมสรสุข. 2552. การตรวจเชื้อ *Campylobacter* spp. จาก rectal swab ของผู้ป่วยเด็กที่เข้ารับการรักษาในสถาบันบำราศนราดูรด้วยวิธี *cdtB* gene-based multiplex PCR. **วารสารเทคนิคการแพทย์และกายภาพบำบัด** 24(2): 255-163.

ปริชาติ มากอิ่ม, เสกสรรค์ สโมสรสุข, Shinji Yamasaki และ วรดา สโมสรสุข. 2552. การศึกษาความชุกของเชื้อ *Campylobacter* spp. ที่แยกได้จากเด็กที่ไม่มีอาการอุจจาระร่วงในเขตกรุงเทพมหานคร. **วารสารเทคนิคการแพทย์และกายภาพบำบัด** 24(3): 244-250.

Barry, O.N. 2008. *Campylobacter jejuni and Campylobacter coli*, 1185-1191. Steven Edwards. **OIE *Terrestrial Manua*.** OIE Organisation Mondiale de la Sante Animale, France.

Burnette, W.N. 1981. “Western blotting”: electrophoretic transfer of proteins from sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gels to unmodified nitrocellulose and radiographic detection with antibody and radioiodinated protein A. **Journal of Biochemistry & Analytical Biochemistry** (112): 195–203.

Jacops-Reitsma, W.F., A.W. van de Giessen, N.M. Bolder and R.W. Mulder. 1995. Epidemiology of *Campylobacter* spp. at two Dutch broiler farms. **Epidemiology & Infection**. (114): 413-421.

Karen, L. 2007. **A molecular investigation of *Campylobacter jejuni* pathogenesis**. Ph.D. Thesis, Royal Melbourne Institute of Technology University.

Kohler G. and C. Milstein. 1975. Continuous cultures of fused cells secreting antibody of predefined specificity. **Nature** (256): 495-497.

Laemmli, U.K. 1970. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. **Nature** (227): 680–685.

Moser, I., W. Schroeder and S. Johann. 1997. *Campylobacter jejuni* majr outer membrane protein and a 59-kDa protein are involved in binding to fibrnectin and INT 407 cell membranes. **FEMS Microbiology Letters** (157): 233-238.

Newell, D.G., H. Mcbide and A.D. Peason. 1983. The identification of outer membrane proteins and flagella of *Campylobacter jejuni*. **Journal of General Microbiology** (130): 1201-1208.

Newell, D.G. 1985. Monoclonal antibodies directed against the flagella of *Campylobacter jejuni*: cross-reacting and serotypic specificity and potential use in diagnosis. **Journal of Hygiene** (96): 377-384.

Qian, H., E. Pang, J. Chang, S.L. Toh, F.N. Kheong , A.L. Tan and J. Kwang. 2008. Monoclonal antibody binding to the major outer membrane protein of *Campylobacter coli*. **Journal of Immunological Methods** (339): 104–113.

Skirrow, M.B. 1994. Diseases due to *Campylobacter*, *Helicobacter* and related bacteria. **Journal of Comparative Pathology** (111): 113-149.

สาขาพันธุวิศวกรรม

Subject: Genetic Engineering

ภาคบรรยาย

Oral Presentation

Statistics and Interpretation of Non-B DNA Sequence Motifs in TTSMI Database

Piroon Jenjaroenpun[1,2], Vladimir A. Kuznetsov[2*] and Kiattawee Choowongkomon[1*]

ABSTRACT

Triplex-forming oligonucleotide (TFO) is currently considered as new potential antigene therapy because it can regulate and modify target gene in a sequence-specific manner. In past decade, triplex target DNA site (TTS) have been identified in the human genomes and found to be enriched in gene promoter. Recently, TTS Mapping and Integration (TTSMI; http://ttsmi.bii.a-star.edu.sg) database has been developed to collect relevant TTS candidates for gene regulation and genome modification in the human genome. Here, we aim to extend knowledge of using TTSMI database together with non-B DNA sequences information. The formation of these non-B DNA structures could obstruct the formation of a TFO and its TTS. The identification of TTS candidates with or without non-B DNA structures overlapping could be useful for the development and optimization of a TFO design. Our research provides statistics and interpretation of identified TTSs in gene regulatory regions together with non-B DNA sequence motifs.

Key words: TTSMI database, Triplex forming oligonucleotide, non-B DNA structure, G-quadruplex, H-DNA, homoduplex

* Corresponding author; e-mail address: **vladimirk@bii.a-star.edu.sg** and **fsciktc@ku.ac.th**

[1]Interdisciplinary Graduate Program in Genetic Engineering, Graduate School, Kasetsart University, Bangkean, Bangkok, Thailand 10900

[2]Bioinformatics Institute, 30 Biopolis Street, #07-01 Matrix, Singapore 138671

INTRODUCTION

Triplex-forming oligonucleotides (TFOs) are short single-stranded oligonucleotide (10-40 nucleotides) that can specifically bind to the major groove of duplex nucleic acids and promote the formation of triple-helix (triplex) structures (Le Doan et al., 1987, Moser and Dervan, 1987) (Figure 1).

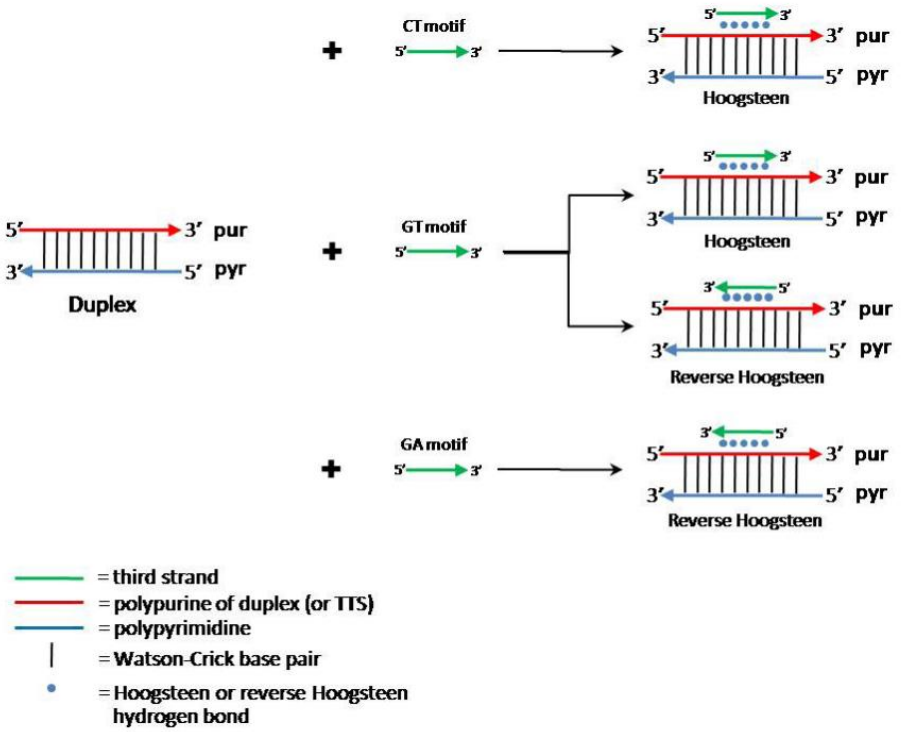


Figure 1 Schema shows triplex formation. TFO (in green color) can bind to double-stranded DNA with Hoogsteen and reversed Hoogsteen hydrogen bond depending on type of TFO motifs: [C,T], [G,T], and [G,A] motif.

With site-specific recognition ability, TFO can be used to regulate or modify target gene specifically and selectively at the genomic DNA level via triplex-based approaches (Helene, 1991). There are increasing evidences that TFOs could be important in the regulation of gene expression and the modification of a specific gene region both *in vitro* and *in vivo* (Duca et al., 2008, McNeer et al., 2011, Paquet et al., 2011, Trojan et al., 2012, Rogers et al., 2013). Moreover, TFO has attracted substantial research interests in development of novel TFO strategies for anti-gene therapy (Mukherjee and Vasquez, 2011) and in identification of TFO-binding target in the human genomes, called triplex target DNA site (TTS).

There are only a few computational models and databases have been developed for predicting the TTS in the human genomes (Gaddis et al., 2006, Jenjaroenpun and Kuznetsov, 2009, Buske et al., 2012, Buske et al., 2013). Recently, TTS Mapping and Integration (TTSMI; http://ttsmi.bii.a-star.edu.sg) database have been developed to identify relevant TTS candidates for gene regulation and genome modification in the human genome (Jenjaroenpun et al., 2014). The TTSMI database incorporates

several gene regulatory regions and estimate number of potential off-targets. Moreover, TTSMI database provides information of the so-called non-B DNA-forming sequence motifs (Cer et al., 2013), including cruciform (type of inverted repeat), G-quadruplexes, intra-molecular triplexes or HDNA (type of mirror repeat), and hairpins (type of direct repeat) in which TTS are located. The formation of these non-B DNA structures could obstruct the formation of a TFO and its TTS. The identification of TTS candidates with or without non-B DNA structures overlapping could be useful for the development and optimization of a TFO design. Therefore, this research aimed to provide statistics and interpretation of identified TTSs containing non-B DNA sequence motifs.

MATERIALS AND METHODS

1. TTS mapping algorithm

The TTS mapping algorithm (Jenjaroenpun and Kuznetsov, 2009) was re-designed to search all possible polypurine sequences which subject to the following criteria: 1) length ranging from 15 to 30 nucleotides, 2) guanine content ranging from 20 to 90%, and 3) number of pyrimidine interruptions no greater than 1.

2. Construction and Implementation of the TTSMI database

The construction of the TTSMI database is shown in Figure 2. A collection of TTSs was retrieved by searching the human genome using our TTS mapping algorithm. To identify unique TTS in the human genome, Bowtie version 1.0.0 with modified parameters ('-n 0') was used to filter out duplicated sequences. The unique TTS, selected UCSC annotations, and non-B database annotation (Zhao et al., 2010, Cer et al., 2013), including G-quadruplexes, Z-DNA motif, mirror repeat, direct repeat, short tandem repeat, A-phased repeat, and inverted repeat were integrated by overlapping at least one nucleotide of the TTS and the annotations. The integrated data was pre-computed and stored in MySQL database.

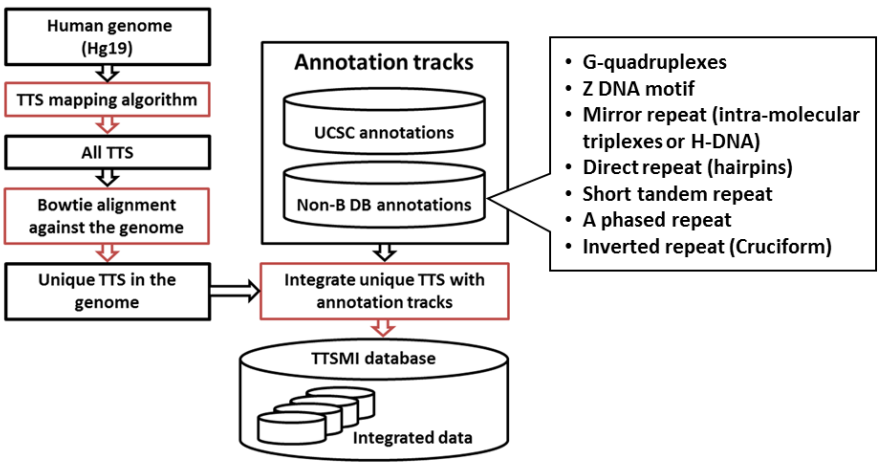


Figure 2 Construction pipeline of the TTSMI database.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Using the TTSMI database to identify TTS containing non-B DNA-forming sequence motifs

One of the key factors for efficiency of triplex formation is accessibility of TFO to its genomic targets i.e. TTS. Previous studies have shown that non-B DNA conformations, e.g. G-quadruplex (Olivas and Maher, 1995, Olivas and Maher, 1995), can reduce the efficiency of triplex formation by competitive formation of triplex and non-B DNA structure in the TFO as shown in green line of right panel of Figure 3. Since the sequence of TFO and TTS are almost the same sequence profile, the TTS could in principle form non-B DNA structure competing with triplex formation (Amato et al., 2009) as shown in dark blue line of right panel of Figure 3.

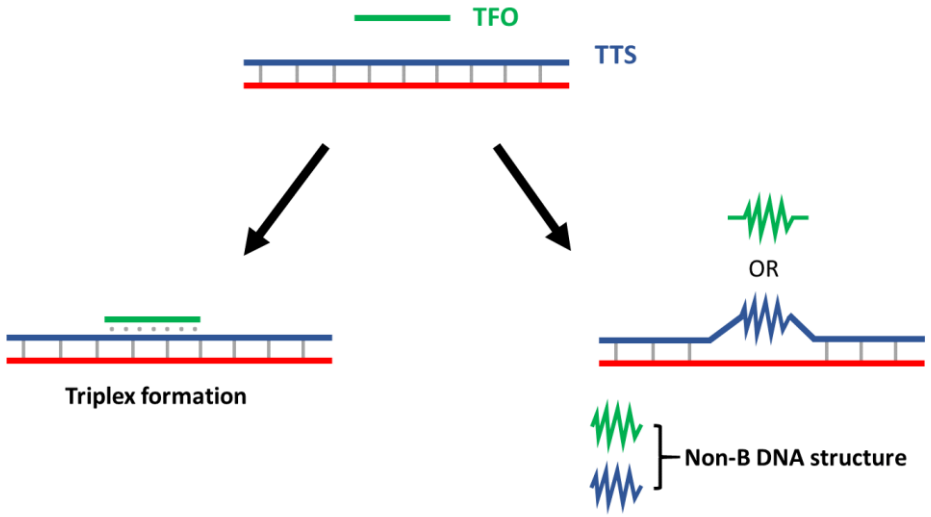


Figure 3 The schema shows the possible DNA formation of TFO (green line) and TTS (dark blue line). Left-panel shows triplex formation between TFO and TTS. Alternatively, TFO or TTS containing non-B DNA sequence motifs could form non-B DNA structure competing with triplex formation.

Hence, it is worth to annotate TTS whether they contain non-B DNA sequence motifs. This information will be useful for the development and optimization of a TFO design. In the TTSMI database, annotation of non-B DNA sequence motifs have been provided in two places on the TTSMI web page. The first place, the non-B DNA annotation is located under sub-title “Gene regulatory elements” (Figure 4A). The list of non-B DNA sequence motifs will appear when ‘Non-B DNA’ is checked. Using this option, the user can select either TTS contains any non-B DNA sequence motifs or an individual non-B DNA sequence motif i.e. G-quadruplexes, Z-DNA motif, mirror repeat, direct repeat, short tandem repeat, A-phased repeat, or inverted repeat (Figure 4A). The second place, the non-B DNA annotation is located under sub-title “Excluding tracks” (Figure 4B). Using this option, the user can select either TTS does not contain any non-B DNA sequence motifs or an individual non-B DNA sequence motif.

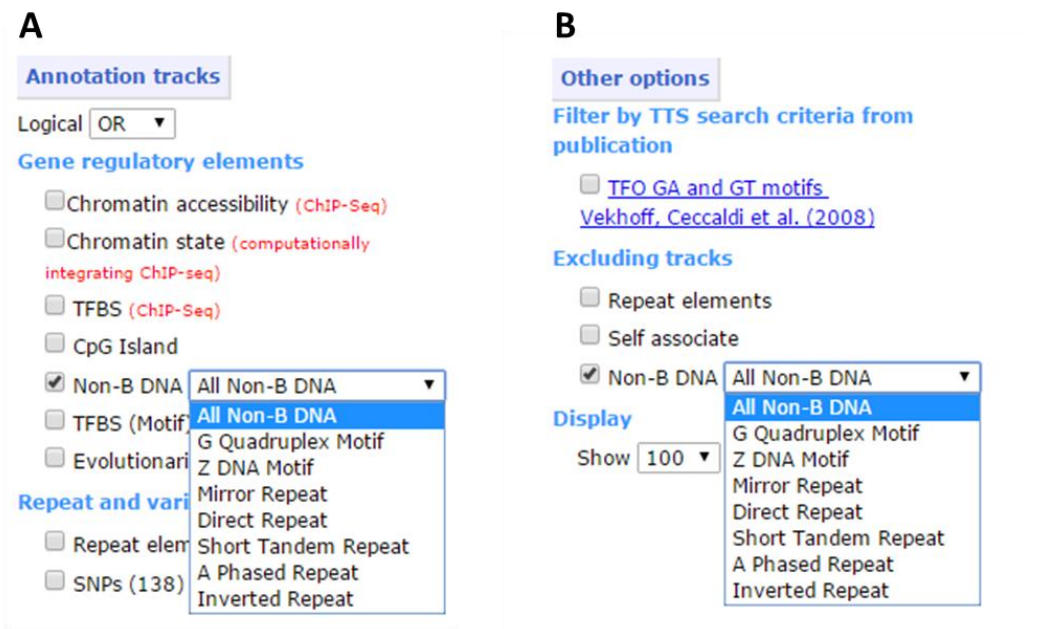


Figure 4 The non-B DNA annotations can be found on the TTSMI web page under (A) "Gene regulatory elements" and (B) "Excluding tracks".

2. Statistics of TTS containing non-B DNA sequence motifs

The TTSs were separated into 6 groups (C1-C6 in Table 1) according to TTS search criteria i.e. percentage of guanine content (%G), number of pyrimidine interruption (pyr), and number of three consecutive guanines (#GpGpG) (Jenjaroenpun et al., 2014). Number of TTS, which locates in gene regulatory region annotations (Raney et al., 2011, Jenjaroenpun et al., 2014) i.e. chromatin accessibility, chromatin state and transcription factor binding sites (TFBS), were presented in Table 1. In total, there are 13.5 million TTSs locating in the gene regulatory regions. Majority of the TTSs were in the TTS search criteria: C4 (7.2 million TTSs; 53%), C2 (2.7 million TTSs; 20%), and C3 (2.2 million TTSs; 17%), respectively (Table 1).

Then, percentage of TTS overlapping with any non-B DNA sequence motifs were calculated. Sixty-one percent of the TTSs (8.2 million) contain non-B DNA sequence motifs especially in the C1, C3, C5, and C6 TTS search criteria (Table 1). Therefore, the non-B DNA sequence motifs should take into consideration when designing TFO since most of the TTSs can form non-B DNA conformations.

Table 1 Statistics for the TTSs in gene regulatory regions i.e.chromatin accessibility, chromatin state , TFBS and non-B DNA sequence motifs. The number of TTS is categorized according to TTS search criteria and labeled by C1-C6.

Criteria Label	TTS search criteria			Number of TTS in the gene regulatory regions	Number of TTS with any non-B DNA motifs (%)
	%G	pyr	#GpGpG		
C1	<40	0	<4	630,863	521,320 (83%)
C2	<40	1	<4	2,701,922	1,406,937 (52%)
C3	≥40	0	<4	2,262,545	1,848,833 (82%)
C4	≥40	1	<4	7,224,469	3,752,374 (52%)
C5	≥40	0	≥4	304,309	301,012 (99%)
C6	≥40	1	≥4	464,757	445,014 (96%)

%G, guanine content; pyr, #pyrimidine interruptions; #GpGpG, number of three consecutive guanines;

Then, those TTSs containing non-B DNA sequence motifs were dissected into 7 categories as shown in Table 2. More than 94% of TTSs in C5 and C6 contain the G-quadruplex motif, while other TTS search criteria have major fraction in the mirror repeat and the short tandem repeat. Previous studies have shown that mirror repeat can adopt intramolecular triplexes (Jain et al., 2008) and short tandem repeat can fold into intramolecular triplex (Jain et al., 2008) or homoduplex (Noonberg et al., 1995). Therefore TFO development for these TTS candidates must consider the possibility of forming self-structure e.g. intramolecular triplex or homoduplex on TFO, as well as formation of non-B DNA structure on TTS.

In past decade, many research groups attempted to overcome several limitations of using TFO in living cell and self-structure is one of the limitations. To overcome this limitation, chemical modifications have been applied in the bases, in the backbone, or in sugar of the oligonucleotides (for more information, see the review (Duca et al., 2008)). Previous studies have been shown that the modified TFO could decrease the competitive self-structure (Chan and Glazer, 1997, Buchini and Leumann, 2003, Seidman and Glazer, 2003).

Table 2 Statistics of number of TTS in gene regulatory regions and induvial non-B DNA sequence motif. The number of TTS is categorized as described earlier in Table 1. The underline represent the highest fraction of TTS in a given motif comparing to others.

Criteria Label	No. of TTS with any non-B DNA motifs	No. of TTS with G-quadruplex motif (%)	No. of TTS with Z-DNA motif (%)	No. of TTS with Mirror repeat (%)	No. of TTS with Direct repeat (%)	No. of TTS with Short tandem repeat (%)	No. of TTS with A-phated repeat (%)	No. of TTS with Inverted repeat (%)
C1	521320	16581 (3.2%)	151 (0.03%)	419854 (80.5%)	289962 (55.6%)	353828 (67.9%)	8519 (1.63%)	16136 (3.10%)
C2	1406937	26551 (1.9%)	1380 (0.10%)	873487 (62.1%)	511059 (36.3%)	881942 (62.7%)	40271 (2.86%)	107230 (7.62%)
C3	1848833	492967 (26.7%)	562 (0.03%)	1543887 (83.5%)	1005708 (54.4%)	1083169 (58.6%)	13313 (0.72%)	38412 (2.08%)
C4	3752374	1012387 (27.0%)	4727 (0.13%)	2452232 (65.4%)	1357988 (36.2%)	1900656 (50.7%)	36941 (0.98%)	203965 (5.44%)
C5	301012	283152 (94.1%)	48 (0.02%)	264811 (88%)	217596 (72.3%)	177093 (58.8%)	626 (0.21%)	3840 (1.28%)
C6	445014	419026 (94.2%)	371 (0.08%)	298604 (67.1%)	219658 (49.4%)	219590 (49.3%)	646 (0.15%)	12329 (2.77%)

CONCLUSION

Using TTSMI database, the users can identify triplex target DNA sequence in the human genome together with annotation of several gene regulatory elements and with non-B DNA sequence motifs, which are potential competitive structure to triplex formation. In this research, more than half (61%) of TTSs in gene regulatory regions contain non-B DNA sequence motifs. Specifically, there are major fraction of these TTSs are associated with G-quadruplex, intramolecular triplex or H-DNA, and homoduplex structures. Hence, to choose TTS candidates for gene moderation or genome modification using TTSMI database, the user should not only consider unique of TTS in the human genomeless off-target effect, TTS in chromatin accessibility region and gene regulatory signals, but also, should consider non-B DNA structures in TFO and TTS. In this case, the developed TFO could increase chance of a successful in order to be effective.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to Dr.Vachiranee Limviphuvadh for reading the manuscript and her very useful comments and suggestions. Financial support from Biomedical Research Council of Agency for Science, Technology and Research (A*STAR), Singapore was gratefully acknowledged.

REFERENCES

Amato, J., G. Oliviero, E. De Pauw and V. Gabelica. 2009. Hybridization of short complementary PNAs to G-quadruplex forming oligonucleotides: An electrospray mass spectrometry study. **Biopolymers** 91(4): 244-255.

Buchini, S. and C. J. Leumann. 2003. Recent improvements in antigene technology. **Curr Opin Chem Biol** 7(6): 717-726.

Buske, F. A., D. C. Bauer, J. S. Mattick and T. L. Bailey. 2012. Triplexator: detecting nucleic acid triple helices in genomic and transcriptomic data. **Genome Res** 22(7): 1372-1381.

Buske, F. A., D. C. Bauer, J. S. Mattick and T. L. Bailey. 2013. Triplex-Inspector: an analysis tool for triplex-mediated targeting of genomic loci. **Bioinformatics** 29(15): 1895-1897.

Cer, R. Z., D. E. Donohue, U. S. Mudunuri, N. A. Temiz, M. A. Loss, N. J. Starner, G. N. Halusa, N. Volfovsky, M. Yi, B. T. Luke, A. Bacolla, J. R. Collins and R. M. Stephens. 2013. Non-B DB v2.0: a database of predicted non-B DNA-forming motifs and its associated tools. **Nucleic Acids Res** 41(Database issue): D94-D100.

Chan, P. P. and P. M. Glazer. 1997. Triplex DNA: fundamentals, advances, and potential applications for gene therapy. **J Mol Med (Berl)** 75(4): 267-282.

Duca, M., P. Vekhoff, K. Oussedik, L. Halby and P. B. Arimondo. 2008. The triple helix: 50 years later, the outcome. **Nucleic Acids Res** 36(16): 5123-5138.

Gaddis, S. S., Q. Wu, H. D. Thames, J. DiGiovanni, E. F. Walborg, M. C. MacLeod and K. M. Vasquez. 2006. A web-based search engine for triplex-forming oligonucleotide target sequences. **Oligonucleotides** 16(2): 196-201.

Helene, C. 1991. The anti-gene strategy: control of gene expression by triplex-forming-oligonucleotides. **Anticancer Drug Des** 6(6): 569-584.

Jain, A., G. Wang and K. M. Vasquez. 2008. DNA triple helices: biological consequences and therapeutic potential. **Biochimie** 90(8): 1117-1130.

Jenjaroenpun, P., C. S. Chew, T. P. Yong, K. Choowongkomon, W. Thammasorn and V. A. Kuznetsov. 2014. The TTSMI database: a catalog of triplex target DNA sites associated with genes and regulatory elements in the human genome. **Nucleic Acids Res** 43(Database issue): D110-D116.

Jenjaroenpun, P. and V. A. Kuznetsov. 2009. TTS mapping: integrative WEB tool for analysis of triplex formation target DNA sequences, G-quadruplets and non-protein coding regulatory DNA elements in the human genome. **BMC Genomics** 10 Suppl 3: S9.

Le Doan, T., L. Perrouault, D. Praseuth, N. Habhoub, J. L. Decout, N. T. Thuong, J. Lhomme and C. Helene. 1987. Sequence-specific recognition, photocrosslinking and cleavage of the DNA double

helix by an oligo-[alpha]-thymidylate covalently linked to an azidoproflavine derivative. **Nucleic Acids Res** 15(19): 7749-7760.

McNeer, N. A., J. Y. Chin, E. B. Schleifman, R. J. Fields, P. M. Glazer and W. M. Saltzman. 2011. Nanoparticles deliver triplex-forming PNAs for site-specific genomic recombination in CD34+ human hematopoietic progenitors. **Mol Ther** 19(1): 172-180.

Moser, H. E. and P. B. Dervan. 1987. Sequence-specific cleavage of double helical DNA by triple helix formation. **Science** 238(4827): 645-650.

Mukherjee, A. and K. M. Vasquez. 2011. Triplex technology in studies of DNA damage, DNA repair, and mutagenesis. **Biochimie** 93(8): 1197-1208.

Noonberg, S. B., J. C. Francois, T. Garestier and C. Helene. 1995. Effect of competing self-structure on triplex formation with purine-rich oligodeoxynucleotides containing GA repeats. **Nucleic Acids Res** 23(11): 1956-1963.

Olivas, W. M. and L. J. Maher, 3rd. 1995. Competitive triplex/quadruplex equilibria involving guanine-rich oligonucleotides. **Biochemistry** 34(1): 278-284.

Olivas, W. M. and L. J. Maher, 3rd. 1995. Overcoming potassium-mediated triplex inhibition. **Nucleic Acids Res** 23(11): 1936-1941.

Paquet, J., C. Henrionnet, A. Pinzano, J. B. Vincourt, P. Gillet, P. Netter, I. Chary-Valckenaere, D. Loeuille, J. Pourel and L. Grossin. 2011. Alternative for anti-TNF antibodies for arthritis treatment. **Mol Ther** 19(10): 1887-1895.

Raney, B. J., M. S. Cline, K. R. Rosenbloom, T. R. Dreszer, K. Learned, G. P. Barber, L. R. Meyer, C. A. Sloan, V. S. Malladi, K. M. Roskin, B. B. Suh, A. S. Hinrichs, H. Clawson, A. S. Zweig, V. Kirkup, P. A. Fujita, B. Rhead, K. E. Smith, A. Pohl, R. M. Kuhn, D. Karolchik, D. Haussler and W. J. Kent. 2011. ENCODE whole-genome data in the UCSC genome browser (2011 update). **Nucleic Acids Res** 39(Database issue): D871-875.

Rogers, F. A., R. H. Hu and L. M. Milstone. 2013. Local delivery of gene-modifying triplex-forming molecules to the epidermis. **J Invest Dermatol** 133(3): 685-691.

Seidman, M. M. and P. M. Glazer. 2003. The potential for gene repair via triple helix formation. **J Clin Invest** 112(4): 487-494.

Trojan, J., Y. X. Pan, M. X. Wei, A. Ly, A. Shevelev, M. Bierwagen, M. Y. Ardourel, L. A. Trojan, A. Alvarez, C. Andres, M. C. Noguera, I. Briceno, B. H. Aristizabal, H. Kasprzak, H. T. Duc and D. D. Anthony. 2012. Methodology for Anti-Gene Anti-IGF-I Therapy of Malignant Tumours. **Chemother Res Pract** 2012: 721873.

Zhao, J., A. Bacolla, G. Wang and K. M. Vasquez. 2010. Non-B DNA structure-induced genetic instability and evolution. **Cell Mol Life Sci** 67(1): 43-62.

Isolation and characterization of thermotolerant *Komagataeibacter* species for bacterial cellulose and acetic acid production at high temperature

Kallayanee Naloka[1], Pattaraporn Rattanawaree[2] and Gunjana Theeragool[1,3*]

ABSTRACT

Thermotolerant acetic acid bacteria (AAB) especially *Acetobacter* and *Komagataeibacter* (formerly *Gluconacetobacter*, *Ga*.) play important role in industrial vinegar fermentation and bacterial cellulose (BC) production. In this study, we selected 20 thermotolerant BC-producing isolates from various kinds of fruits in Thailand. All isolates (MSKU1- MSKU20) were characterized for molecular taxonomy, BC and acetic acid productions. Phylogenetic analyses of 16S rRNA gene showed that 20 isolates belong to genus *Komagataeibacter*. Interestingly, MSKU20 isolated from persimmon (*Diospyros kaki*) was formed an independent cluster along with the type strains of *Ga. entanii* LTH4560^{T}, *K. maltaceti* LMG 1529 ^{T}, *K. hansenii* NBRC14820^{T} and *K. kombuchae* RG3^{T}. The isolate was closely related to *Ga. entanii* LTH4560^{T}, one of the closest relatives, with 99.4%16S rRNA gene sequence similarity. However, this mentioned isolate showed low levels of DNA–DNA relatedness (<70%) with the closely related members. These results indicated that MSKU20 may be considered as a novel species. Further investigation for physiological and biochemical characteristics of those isolates are carried out. Determination of the relationship between BC production and acetic acid toleration indicated that MSKU12 produces the highest BC yield of 5.221 $\pm$ 0.411 g/L in Hestrin–Schramm (HS) medium containing 1% (v/v) acetic acid at 37°C. In addition, MSKU3, another isolate, exhibits the highest acetic acid production in HS medium containing 4% (v/v) ethanol at 37°C. The results suggest that thermotolerant BC-producing strains of genus *Komagataeibacter* act as a representative strains for acetic acid fermentation and BC production at high temperature.

Key words: Acetic acid bacteria, Bacterial cellulose, 16S rRNA gene sequence, *Komagataeibacter*, thermotolerance

*Corresponding author; e-mail address: **fscignt@ku.ac.th**

[1]Interdisciplinary Graduate Program in Genetic Engineering, The Graduate School, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[2]National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), National Science and Technology Development Agency, Thailand Science Park, 113 Paholyothin Road, Pathumthani, 12120

[3]Department of Microbiology, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Acetic acid bacteria (AAB) are important bacteria in food and beverage industries, due to their ability to oxidize ethanol to acetic acid and tolerate against high acetic acid concentration accumulated in culture medium. The optimum growth temperature of AAB is in range 25-30°C, and thus requires a cooling system to maintain the temperature of culture medium during fermentation process. In order to overcome this problem under global warming era, thermotolerant AAB especially the strains isolated in tropical area are of interested to be characterized. These bacteria are gram negative or gram variable, ellipsoidal to rod shape, which occurs as single cells and/or in pairs. They are isolated from a variety of natural sources such as fruits, flowers, vinegar, alcoholic beverages and rarely found in soils and insect guts (Yamada and Yukplan, 2008; Crotti *et al*., 2010). Recently, some species of *Acetobacter* reclassified as *Komagataeibacter* are well known to produce BC (Yamada *et al*., 2012). This BC is chemically identical to the cellulose produced by higher plants, fungi and seaweeds, but its structure and properties are different (Ross *et al*., 1991; Jung *et al*., 2010). BC includes the unique features such as extreme purity, high degree of crystallization, water retention value and tensile strength. Because of all these unique properties, BC has been increasingly considered for scientific interests and economical BC production (Klemm *et al*., 2001). BC is mainly applied in various fields such as thickener to maintain viscosity in food, cosmetics, etc. It is also used as woven fabric or paper for old document repair, food additives, medical devices and others. Moreover, it has high potential as a temporary substitute for human skin in the case of burn, ulcers, decubitus and others. Biofill®, Bioprocess® and Gengiflex® are products of BC, which were widely used in surgery and dental implants (Vandamme *et al*., 1998). However, commercial BC application has been limited, due to the low amount of BC in large-scale production. In addition, there are very few microorganisms capable of producing mass BC production at high temperature. In this study, we focused on a new isolate that produces the high amount of BC and acetic acid at high temperature. We isolated thermotolerant BC producing AAB from various kinds of fruits collected in Thailand. Further characterization such as molecular taxonomy and a various physiological properties such as ethanol oxidation and BC production related to acetic acid resistance were investigated.

MATERIALS AND METHODS

1. Isolation of AAB and selection of BC producing strains

AAB were isolated from various fruits such as banana, coconut, grape, jackfruit, lychee, persimmon, pomegranate, rambai, rose apple, santol, sapodilla, star apple, etc. which were collected in Thailand. The samples were cut into small pieces and placed in a sterile bottle covered with sterile white gauze for prevention of insects. Distilled water containing 1% (v/v) acetic acid or 4% (v/v)

ethanol was added to submerge of fruit sample and then, statically incubated at 30 or 37°C. After incubation, a loop of the sample was streaked on the YPGD agar containing 4% (v/v) ethanol, 0.5% $CaCO_3$ and 0.004% bromocresol purple. The positive yellow colonies were selected and maintained in potato medium containing 50% glycerol. Then, BC producing strains were selected by the BC formation of a white pellicle on the surface of potato broth that was statically incubated at 30°C for 7 days.

2. Molecular identification by 16S rRNA gene sequencing

The genomic DNA was extracted by method described in Okumura *et al*. (1985) with slight modifications. The 16S rRNA gene was amplified by PCR amplification using universal primers, 27F (5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3') and 1525R (5'-AAA GGA GGT GAT CCA GCC -3'). The amplified fragment was carried out on a Gene Amp® PCR System 2400; Perkin Elmer. The obtained PCR product was cloned into pGEM®-T Easy vector (Promega, Medison, WI, USA) and sequenced with BigDye® Terminator v3.1 cycle sequencing kit (First BASE Laboratories Sdn Bhd, Selangor Darul Ehsan, Malaysia) according to the manufacturer's instruction. The following four primers were used for sequencing, universal vector primers (T7 and SP6) and universal primers, 518F (5'-CCA GCA GCC GCG GTA ATA CG-3') and 800R (5'-TAC CAG GGT ATC TAA TCC-3'). Multiple sequence alignments were performed along with the sequences of representative members of AAB obtained from the GenBank/EMBL/DDBJ databases by using ClustalX program (Thompson *et al*., 1997) and the BioEdit sequence alignment editor (http://www.mbio.ncsu.edu/BioEdit/bioedit.html). The parameter method of Kimura (1980) was used for distance matrices calculation of aligned sequences. The phylogenetic tree based on 16S rRNA gene sequence was constructed by the neighbor-joining method of Saitou and Nei (1987) with the program MEGA 5 (Tamura *et al*., 2011).

3. BC production related to acetic acid resistant ability

All 20 isolates were cultivated in 5 ml of potato medium containing 250 µl of 10 mg/ml cellulase and then incubated at 30°C on a rotary shaker at 200 rpm for 2 days. Then, cells were harvested and washed by HS medium for removing cellulase. After that, suspended cells were inoculated into HS medium containing 0.5, 1.0, and 1.5% (v/v) acetic acid and statically incubated at 30 and 37°C for 7 days. The white pellicle floating on the surface of the medium were treated with 0.3 M NaOH at 100°C for 5 min to eliminate attached cells, followed by three times washes with distilled water to remove medium components and other residues. The purified cellulose was subsequently dried at 105°C to obtain constant weight (Park *et al*., 2003). The BC production was expressed as dry weight of cellulose per liter of medium.

4. Acetic acid production

BC producing strains were inoculated in 5 ml of potato medium containing 250 µl of 10 mg/ml cellulase and incubated at 30°C on a rotary shaker at 200 rpm for 2 days. In order to determine acetic acid production, the cells were further cultivated in HS medium containing 4% (v/v) ethanol incubated at 30 and 37°C on a rotary shaker at 200 rpm for 3 days. The acidity of the culture medium was measured by titration with 0.8 N NaOH using phenolphthalein as the pH indicator.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Isolation of AAB and selection of BC producing strains

In this study, 47 samples of rotten fruits were collected and 167 bacterial isolates were selected as thermotolerant AAB. They were then examined for BC production using HS medium. As results, 20 isolates of BC producing thermotolerant strains were obtained from 12 kinds of fruits (Figure 1).

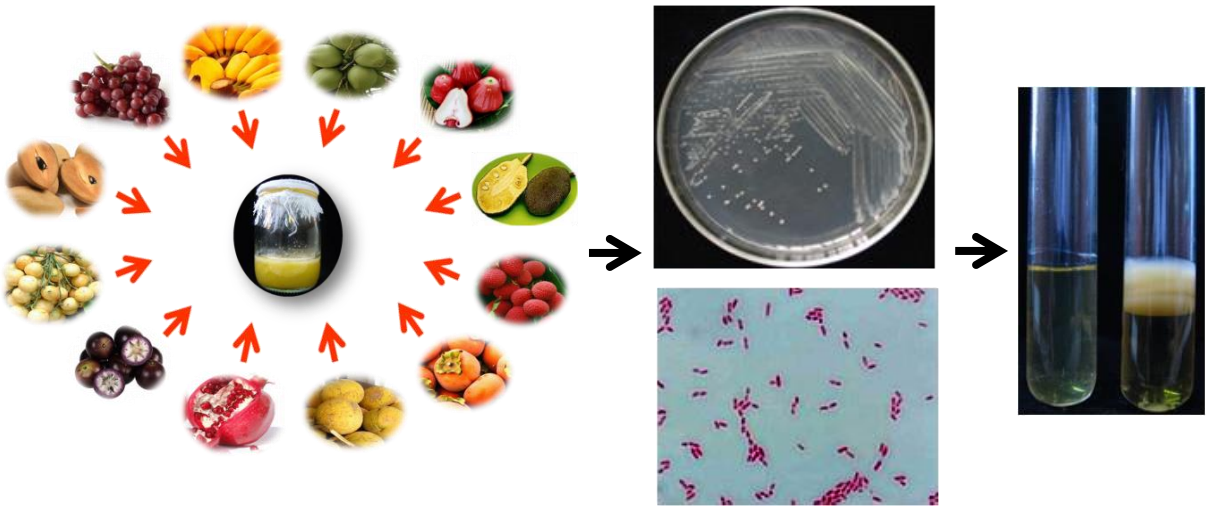


Figure 1 Schematic diagram illustrates the isolation and preliminary characterization of BC producing AAB from banana, coconut, grape, jackfruit, lychee, persimmon, pomegranate, rambai, rose apple, santol, sapodilla and star apple collected in Thailand.

2. Molecular identification by 16S rRNA gene sequencing

The isolates (MSKU1-20) were identified as the species belong to genus *Komagataeibacter*. Interestingly, the phylogenetic tree based on 16S rRNA gene sequences constructed from Neighbor-joining algorithm showed that MSKU20 formed cluster along with the type strain of *Ga. entanii* LTH4560^{T}, *K. maltaceti* LMG 1529 ^{T}, *K. hansenii* NBRC14820^{T} and *K. kombuchae* RG3^{T} with 99.4, 99.4, 99.2 and 99.1% of 16S rRNA gene sequence similarity, respectively (Figure 2). However, the phylogenetic branch between MSKU20 and its type strain was much far from each other and showed

low levels of DNA–DNA relatedness (<70%) with the closely related members so it may be a new species. Further investigation for physiological and biochemical characterization will be carried out.

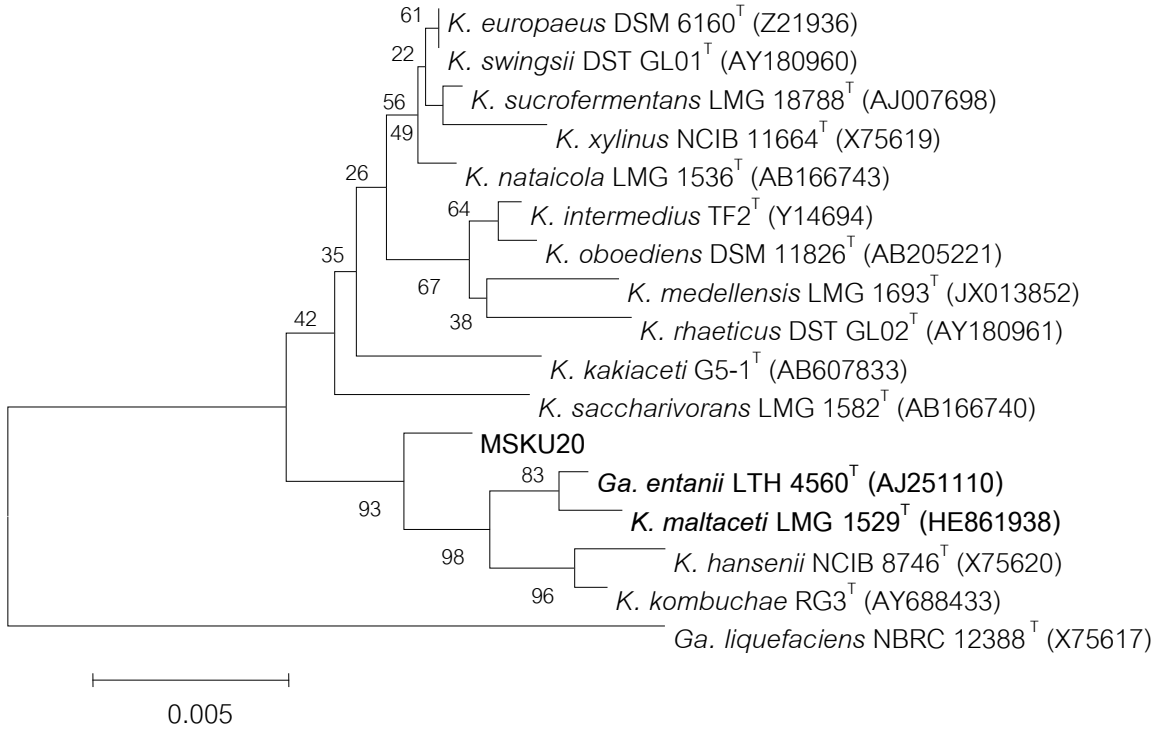


Figure 2 Phylogenetic relationships of *Komagataeibacter* sp. MSKU20 and related taxa based on the 16S rRNA gene sequence. The phylogenetic tree was constructed by the neighbour-joining method. Numbers indicate bootstrap percentages derived from 1,000 replications.

3. BC production related to acetic acid resistant ability

In order to investigate the effect of acetic acid on BC production, amount of BC production was preliminary determined from 20 isolates and type strains (*K. europaeus* BCC 36446^T, *K. hansenii* BCC 12272^T, *K. kombuchae* RG3^T, *K. nataicola* BCC 36443^T, *K. oboediens* BCC 36445^T and *K. xylinus* BCC 49175^T) in HS medium containing 0, 1.0 and 2.0% (v/v) acetic acid at 30°C. The result showed that high amount of BC was observed from MSKU2, 6, 12 and *K. kombuchae* RG3^T in HS medium added 1.0% (v/v) acetic acid (data not shown). Therefore, they were further determined BC production in HS medium containing 0.5, 1.0 and 1.5% (v/v) acetic acid at 30 and 37°C (Figure 3A and 3B). Although *K. kombuchae* RG3^T exhibited higher BC production than three isolates in HS medium without acetic acid at 30°C (Figure 3A), MSKU12 showed higher BC production than *K. kombuchae* RG3^T in HS medium containing 1.0 and 1.5% (v/v) acetic acid at 30 and 37°C. The highest yield of BC (5.221 $\pm$ 0.411 g/L) was obtained from MSKU12 in HS medium containing 1.0% (v/v) acetic acid incubated at 37°C (Figure 3B). The results suggested that acetic acid is directly

related to the pellicle formation, thus, BC pellicle may work as biofilm useful for acetic acid resistance during BC formation of these strains (Kanchanarach *et al*., 2010).

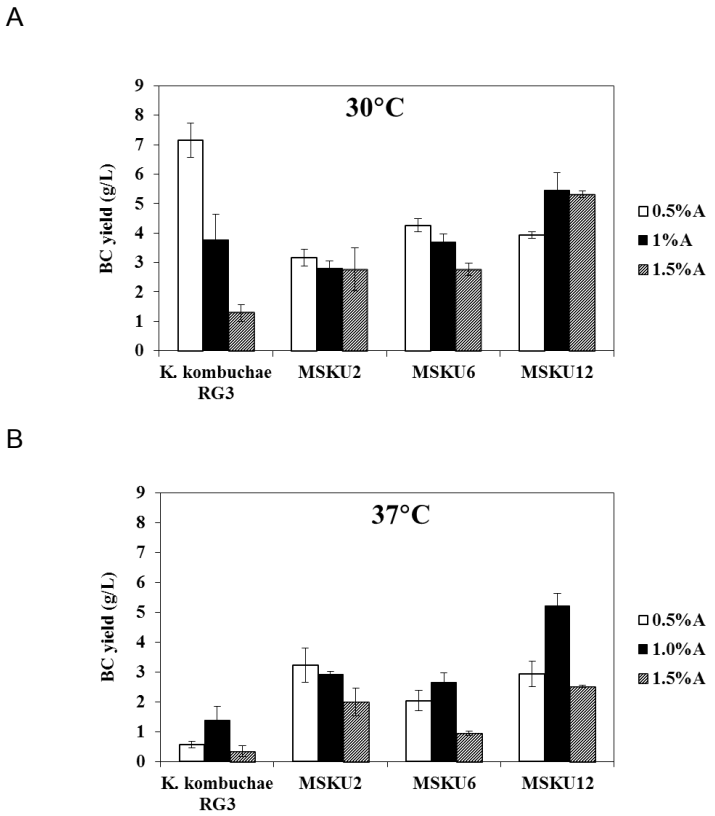


Figure 3 Comparison of BC production related to acetic acid resistant ability from *K. kombuchae* RG3^{T}, MSKU2, 6 and 12 in HS medium containing 0.5, 1 and 1.5% (v/v) acetic acid incubated at (A) 30°C and (B) 37°C for 7 days.

4. Acetic acid resistance and production

The 20 isolates were preliminary determined for acetic acid production in HS medium containing 2% (v/v) ethanol at 30 and 37°C. Among 20 isolates, MSKU3, 5, 11, 14, 16 and 17 showed higher acetic acid production than others (data not shown). The fermentation ability of these thermotolerant strains was further compared with *K. kombuchae* RG3^{T} and *A. pasteurianus* SKU1108 (an acetic acid tolerant strain). The result indicated that acetic acid production of MSKU3, 5, 11, 14, 16 and 17 was superior to that of type strain *K. kombuchae* RG3^{T} having weak growth and very low acetic acid production at 37°C. In addition, MSKU3 strain showed higher acetic acid productivity in a medium containing 4% (v/v) ethanol at 30 and 37°C than *A. pasteurianus* SKU1108 (Figure 4). These results suggested that MSKU3 strain could consider as a representative thermotolerant BC-producing strain for acetic acid production at high temperature.

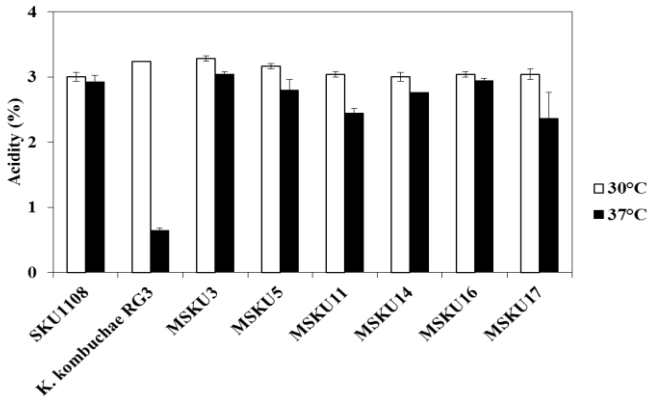


Figure 4 Comparison of acetic acid production of *A. pasteurianus* SKU1108, *K. kombuchae* RG3^{T}, MSKU3, 5, 11, 14, 16 and 17 in HS medium containing 4% (v/v) ethanol at 30 and 37°C for 3 days.

CONCLUSION

All BC producing strains, which were isolated from various kinds of fruits in Thailand, were identified as species in genus *Komagataeibacter*. Among 20 isolates, MSKU20 may be a new species based on 16S rRNA gene sequence and DNA–DNA relatedness (<70%) with the closely related type species. Further investigation for physiological and biochemical characteristics from MSKU20 will be carried out. In addition, MSKU12 and MSKU3 showed the highest amount of BC and acetic acid productions at 37°C, respectively, whereas the related type strain can produce both bacterial cellulose and acetic acid at 30°C not at 37°C. These results revealed that the novel isolated *Komagataeibacter* species are the promising strains for bacterial cellulose and acetic acid production at high temperature.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financial supported by Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST) under National Science and Technology Development Agency (NSTDA). The author also would like to thank National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC) and Department of Microbiology, Faculty of Science, Kasetsart University for their kindness facilitate support.

REFERENCES

Crotti, E., A. Rizzi, B. Chouaia, I. Ricci, G. Favia, A. Alma and D. Daffonchio. 2010. Acetic Acid Bacteria, Newly Emerging Symbionts of Insects. **Appl. Environ. Microbiol.** 76: 6963-6970.

Jung, H.I., J. H. Jeong, O. M. Lee, G. T. Park, K. K. Kim, H. C. Park, S. M. Lee, Y. G. Kim and H. J. Son. 2010. Influence of glycerol on production and structural–physical properties of cellulose from *Acetobacter* sp. V6 cultured in shake flasks. **Bioresource Technol.** 101: 3602-3608.

Kanchanarach, W., G. Theeragool, T. Inoue, T. Yakushi, O. Adachi and K. Matsushita. 2010. Acetic acid fermentation of *Acetobacter pasteurianus*: relationship between acetic acid resistance and pellicle polysaccharide formation. **Biosci Biotechnol Biochem.** 74: 1591-1597.

Kimura, M. 1980. A simple method for estimating evolutionary rates of base substitutions through comparative studies of nucleotide sequences. **J. Mol. Evol.** 16: 111-120.

Klemm, D., D. Schumann, U. Udhardt and S. Marsch. 2001. Bacterial synthesized cellulose — artificial blood vessels for microsurgery. **Prog. Polym. Sci.** 26: 1561-1603.

Okumura, H., T. Uozumi and T. Beppu. 1985. Construction of plasmid vectors and genetic transformation system for *Acetobacter aceti*. **Agric. Biol. Chem.** 49: 1011-1017.

Park, J., Y. Park and J. Jung. 2003. Production of bacterial cellulose *by Gluconacetobacter hansenii* PJK isolated from rotten apple. **Biotechnol. Bioprocess Eng.** 8: 83-88.

Ross, P., R. Mayer and M. Benziman. 1991. Cellulose Biosynthesis and Function in Bacteria. **Microbiol. Rev.** 55: 35-58.

Saitou, N. and M. Nei. 1987. The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. **Mol. Biol. Evol.** 4: 406-425.

Tamura, K., D. Peterson, N. Peterson, G. Stecher, M. Nei and S. Kumar. 2011. MEGA5: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Using Maximum Likelihood, Evolutionary Distance, and Maximum Parsimony Methods. **Mol. Biol. Evol.** 28: 2731–2739.

Thompson, J. D., T. J. Gibson, F. Plewniak, F. Jeanmougin, and D. G. Higgins. 1997. The CLUSTAL_X windows interface: flexible strategies for multiple sequence alignment aided by quality analysis tools. **Nucleic Acids Res.** 25: 4876-4882.

Vandamme, E.J., S. D. Beats, A. Vanbaelen, K. Joris and P.D. Wulf. 1998. Improved production of bacterial cellulose and its application potential. **Polym. Degrad. Stab.** 59: 93-99.

Yamada, Y. and P. Yukphan. 2008. Genera and species in acetic acid bacteria. **Int. J. Food. Microbiol.** 125: 15-24.

Yamada, Y., P. Yukphan, H. T. Lan Vu, Y. Muramatsu, D. Ochaikul, S. Tanasupawat and Y. Nakagawa. 2012. Description of *Komagataeibacter* gen. nov., with proposals of new combinations (*Acetobacteraceae*). **J. Gen. Appl. Microbiol.** 58: 397─404.

Yamada, Y., P. Yukphan, H. T. Lan Vu, Y. Muramatsu, D. Ochaikul, S. Tanasupawat and Y. Nakagawa. 2012. Description of *Komagataeibacter* gen. nov., with proposals of new combinations (*Acetobacteraceae*). **J. Gen. Appl. Microbiol.** 58: 397- 404.

สาขาพันธุวิศวกรรม

Subject: Genetic Engineering

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

การพัฒนาชุดตรวจสอบโปรตีน CRY9C โดยอิมมูโนโครมาโตกราฟี
Development of CRY9C Protein Rapid Detection via GICA

พงศกร สรรค์วิทยากุล[1*] ขนิษฐาวงศ์วัฒนารัตน์[1] ปิยรัตน์ ธรรมกิจวัฒน์[1] ประเสริฐ วงศ์วัฒนารัตน์[2]
และ ศรีเมฆ ชาวโพงพาง[3]
Pongsakorn Sunvittayakul[1*], Khanitha Wongwathanarat[1], Piyarat Thammakijjawat[1],
Prasert Wongwathanarat[2] and Srimekhowpongpang[3]

บทคัดย่อ

การพัฒนาชุดตรวจสอบโปรตีน CRY9C แบบ Strip โดยเหนี่ยวนำการสังเคราะห์โปรตีน CRY9C จากยีน *cry9c* ผู้วิจัยสกัดโปรตีนรีคอมบิแนนท์จากแบคทีเรีย*Escherichia coli*เพื่อใช้เป็นแอนติเจนผลิตแอนติซีรั่ม นำแอนติซีรั่มมาสกัดแอนติบอดี้ชนิดอิมมูโนโกลบูลิน(IgG) แล้วเชื่อมกับอนุภาคทองคำขนาด 40นาโนเมตร โดยใช้แผ่นไนโตรเซลลูโลส เป็นวัสดุนำผ่าน เปรียบเทียบการเชื่อมต่อ electrostatic force และ nearly covalent พบว่าการเชื่อม IgGกับอนุภาคทองคำแบบ nearly covalent ทำให้พันธะของอนุภาคทองคำและIgGมีความเสถียรกว่าการเชื่อมแบบ electrostatic forceเมื่อนำไปผลิตเป็นชุดตรวจสอบโปรตีน พบว่าการพ่นอนุภาคทองคำ-IgG ที่อัตรา 15ไมโครลิตร/เซนติเมตรให้ผลดีที่สุดโดยใช้ Goatanti-rabitIgGความเข้มข้น 330 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ขีดเป็นเส้น control line และใช้ Anti-CRY9C IgGความเข้มข้น 2.3มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ขีดเป็นเส้นTest line ให้ผลการตรวจสอบโปรตีนชัดเจนที่สุดทั้งนี้จากการทดสอบปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดที่ชุดตรวจสอบสามารถตรวจพบโปรตีน CRY9C ได้คือ10นาโนกรัม/ไมโครลิตร เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจนสามารถมองเห็นได้ชัดเจนประมาณ 20 นาทีโดยสามารถเก็บชุดตรวจสอบได้เป็นระยะเวลาประมาณ 3 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง

ABSTRACT

A colloidal gold immunochromatographic assay(GICA) was developed forrapid detectionof CRY9C protein. Nitrocellulose(NC) membrane was used as the carrier,the average diameter of prepared colloidal gold nanoparticle was about 40 nm.The conjugation between gold particleandCRY9C antibody(anti-CRY9CIgG)was done via covalent bnd to stabilize the gold nanoparticles-IgGanti-CRY9C comparing to electrostatic force which was less stabilized. The gold nanoparticles-anti-CRY9CIgG wasimmobilizedonto conjugate padby spraying at 15 µl/cm. The polyclonal CRY9C antibody at 2.3 mg/mland goatanti-rabbit IgGat 330 µg/mlwere coated onto the NC membrane as test-line and control-line, respectively. The LOD of recombinant protein CRY9C in standard solution is 10ng/µl with good reproducibility.The chromatographicanalysis time was less than 20 minwith storage lifetimeof 90 days and no significant different result at 4°C or room temperature

Keywords: GMOs, Immunochromatographic assay (GICA), gold nanoparticles-IgG

* Corresponding author; e-mail address:**pongsakorn.s@doa.in.th**

[1]สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

[1]Biotechnology research and development office, Department of agriculture, Ministry of Agriculture

[2]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์วิทยาเขตรังสิต

[2]Department of Biotechnology, Faculty of Science and Technology,Thammasat University, Rangsit campus

[3]ภาควิชาโรคพืช คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

[3]Department of Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkean campus

คำนำ

การตรวจวิเคราะห์พืชดัดแปลงพันธุกรรมหรือผลิตภัณฑ์พืชดัดแปลงพันธุกรรมในเชิงคุณภาพและปริมาณ วิธีที่นิยมและเป็นมาตรฐานในการตรวจวิเคราะห์คือ PCRและReal-time PCR (Berdal and Holst-Jensen., 2001) สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตรได้พัฒนาเทคนิค Real-time PCR ในการตรวจสอบการปนเปื้อนของข้าวโพดดัดแปรพันธุกรรม MON810, Bt176, Bt11, GA21 และ MON863 โดยได้สภาวะที่เหมาะสมในการทำ Real-time PCR นอกจากนี้กำลังดำเนินการวิจัยพัฒนาเทคนิค Real-time PCR ในการตรวจสอบการปนเปื้อนของข้าวดัดแปรพันธุกรรม Bt63, LL62 และ LL601 อย่างไรก็ดีการตรวจวิเคราะห์โดยวิธีดังกล่าวต้องใช้เวลานานและไม่สะดวก(Mettler M. *et al.*,2005)ต่อการนำไปใช้ในพื้นที่จริงในกรณีที่ต้องมีการเก็บตัวอย่าง สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตรได้พัฒนาชุดตรวจสอบ GLIFT kit เพื่อใช้ตรวจโปรตีน CP4EPSPS ในถั่วเหลืองต้านทานสารกำจัดวัชพืช ซึ่งช่วยให้การตรวจวิเคราะห์มีความสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

อนึ่งประเทศไทยมีนโยบายให้การสนับสนุนการพัฒนาศักยภาพการวิจัยและพัฒนาพันธุวิศวกรรมให้มีความเข้มแข็ง นำไปสู่การพึ่งพาตนเองได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังไม่อนุญาตให้นำเข้าพืชดัดแปลงพันธุกรรมเพื่อการเพาะปลูก ยกเว้นเพื่อการศึกษาทดลองเท่านั้น โดยอาศัยกลไกการควบคุมของพระราชบัญญัติกักพืช พ.ศ. 2507 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2551) ซึ่งกำหนดให้มีพืชดัดแปลงพันธุกรรมจำนวน 89 รายการเป็นสิ่งต้องห้ามนำเข้า ยกเว้นข้าวโพดและถั่วเหลืองที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นอาหารหรือเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะข้าวโพด StarLinkซึ่งทาง องค์การอาหารและยาไม่อนุญาตให้นำเข้าโดยเด็ดขาด โดยได้ออกประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 215 พ.ศ.2544 เรื่อง กำหนดอาหารที่ห้ามผลิต นำเข้า หรือจำหน่าย โดยให้อาหารที่มีการปนเปื้อนสารพันธุกรรมครายไนน์ซี (Cry9C DNA Sequence) หรือโปรตีนที่สร้างมาจากสารพันธุกรรมนี้ ในข้าวโพดและถั่วเหลือง เนื่องด้วยโปรตีน Cry9c มีลักษณะโมเลกุลที่คล้ายกับโปรตีนที่สามารถก่อให้เกิดอาการแพ้ได้ในมนุษย์ (Investigation of Human Health Effects Associated with Potential Exposure to Genetically Modified Corn, 2001)

ในการตรวจสอบโปรตีนชนิดนี้ นิยมใช้เทคนิค ELISA เนื่องจากสามารถตรวจสอบตัวอย่างได้ในปริมาณมากและการเตรียมตัวอย่างสะดวกกว่าวิธีการตรวจสอบแบบอื่น โดยทางสำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืชต้องซื้อชุดตรวจสอบ ELISA (Rica d. l. *et al.,* 2012) จากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาประมาณชุดละ 30,000 บาท ชุดตรวจสอบ 1 ชุด สามารถตรวจสอบได้ 2–10ตัวอย่าง ประเทศไทยต้องสูญเสียงบประมาณเป็นจำนวนมากในการซื้อชุดตรวจสอบนี้ การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตชุดตรวจสอบพืชดัดแปลงพันธุกรรมให้ใช้ได้เองภายในประเทศ ซึ่งจะเป็นการทดแทนการนำเข้าชุดตรวจสอบจากต่างประเทศและลดต้นทุนการตรวจสอบพืชดัดแปลงพันธุกรรม นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาเป็น immune strip ให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการใช้งานกับพื้นที่ในแปลงปลูกหรือด่านตรวจพืชได้อีกประการหนึ่งด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การผลิตรีคอมบิแนนท์โปรตีน CRY9C

นำลำดับเบสของยีน *cry9C*ของข้าวโพดจากฐานข้อมูล NCBI Protein Accession No. Q45733.1(Lambert B. *et al.,* 1996)ขนาด 1,100 bp ไปสังเคราะห์โดยGenScript USA ในพลาสมิดpUC57

โคลนยีน Cry9C เข้าสู่เวคเตอร์ pET 200/D-TOPO®และถ่ายยีนเข้าสู่ *E.coli* BL21 จากนั้นนำเซลล์แบคทีเรีย BL21 ที่ได้รับ Recombinant vector มาเลี้ยงในอาหารเหลว2xYT 100 ml กับ Kanamycin 50 mg/l เพื่อใช้เป็น starter 1 คืน เตรียมอาหารเหลว LB กับน้ำตาล Glucose (1%final concentration)Kanamycin 50 mg/l ปริมาตร 1 – 2 ลิตร จากนั้นนำ starter ที่ได้เติมลงในอาหารที่เตรียมให้ได้ความเข้มข้นสุดท้าย 20% เลี้ยงบ่มที่ 37°C ที่ 250 rpm นาน 1 ชม. หรือ จนกว่าจะได้ OD600 ประมาณ 0.5จากนั้นเติม IPTG 0.5 mMและเลี้ยงต่ออีก 3 ชม. เมื่อครบกำหนดนำเซลล์ทั้งหมดไปปั่นตกตะกอนที่ 10,000 rpm10 นาที จากนั้นนำเซลล์ที่ปั่นตกตะกอนทั้งหมดไปดำเนินการทำ Freeze toll โดยแช่ที่ -80°C 1 ชม. จากนั้นนำออกมาละลายและเติม Lysozyme ประมาณ 2 กรัม เขย่า 2 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปแช่ในน้ำแข็ง 1 ชม.และ นำไปแช่ที่ -80°C อีก 1 ชม. จากนั้นนำมา ปั่นตกตะกอนที่ 10,000 rpm10 นาที 4°Cแล้วนำโปรตีนไปทำให้บริสุทธิ์ผ่าน Colum Ni-NTA

การผลิตแอนติซีรั่มจากกระต่าย

เจาะเลือดกระต่ายเก็บเป็น normal Serum เพื่อใช้เป็น negative control การฉีดครั้งแรกนำโปรตีน Cry9c ซึ่งใช้เป็นแอนติเจนมา Dilute กับน้ำให้ได้ความเข้มข้นที่ 1 mg/ml ปริมาตร1 ml จากนั้นนำไปผสมกับ adjuvant ชนิด Complete อัตราส่วน 1:1 จนเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันสีขุ่นขาว และฉีดเข้าใต้ผิวหนังบริเวณคอกระต่ายประมาณสามครั้งจนหมด ดำเนินการทดลองฉีดติดต่อกันทั้งหมด 3 สัปดาห์โดยเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนที่ฉีดแต่ละครั้งครั้งละ 0.5 mg/ml และเปลี่ยน adjuvant เป็นชนิด incomplete เมื่อครบกำหนดการฉีดสัปดาห์ที่ 3 ทิ้งระยะไว้ 1 สัปดาห์แล้วจึงเริ่มเจาะเพื่อเก็บแอนติซีรั่ม ทั้งหมด 8 ครั้ง ระยะห่าง 1 สัปดาห์/ครั้ง ในการเจาะแต่ละครั้งจะดำเนินการใช้เข็มฉีดยาเจาะที่เส้นเลือดบริเวณใบหูของกระต่ายและเก็บเลือดประมาณ 20 ml/ครั้ง เลือดที่ได้ทิ้งไว้จน Clot แข็งแล้วจึงดูดเก็บ Serum ใสที่แยกชั้นกับเกล็ดเลือด นำไปปั่นที่ 12,000 rpm 10 นาที แล้วดูดส่วนใสซึ่งเป็น Antiserum เก็บไว้ที่ -20°C

การสกัดและการตรวจสอบคุณภาพIgG

นำแอนตีซีรั่มที่ได้มาตกตะกอนโปรตีนด้วย ($NH_4)_2SO_4$ จากนั้นนำไปสกัด IgG ด้วยคอลัมน์ protein A และ ผ่านเครื่อง AKTA pure โดยผสมแอนติซีรั่มที่ตกตะกอนแล้วกับbinding buffer sodium phosphate ความเข้มข้น 20mM ที่pH 7.0 ในอัตราส่วน 1:10 และนำไปผ่านคอลัมน์โปรตีน Aใช้ Elution bufferกรดcitric ความเข้มข้น0.1 M ที่ pH3 ชะตัวอย่างออกมาและเติมNeutralizing buffer Tris-HCL ความเข้มข้น 1 M ที่ pH 9.0 ในหลอดเก็บตัวอย่างเพื่อปรับสภาพ pH ของ IgGที่ได้จากนั้นนำIgGที่ได้ไปดำเนินการทำDesalting เพื่อนำเกลือออกโดยคอลัมน์Desalting เพื่อเปลี่ยนสารละลาย วัด AbsorbanceOD 280 เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นโดยตรวจสอบคุณภาพของ IgG ที่ได้ด้วย SDS-PAGEและทดสอบปฏิกิริยาของ IgG ด้วยวิธี NCM ELISAหรือ Dot blot โดยหยดโปรตีน Cry9C ลงบนแผ่น nitrocellulose membrane ช่องละ 5 µl โดยใช้ความเข้มข้น 5 ความเข้มข้น จากนั้นทดสอบโดยนำ IgG ที่สกัดได้มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 1 mg/ml และทดสอบที่อัตราส่วน 1:2,000 และใช้ BSA กับ blank bufferเป็น negative control

การเชื่อมอนุภาคทองคำด้วย Electrastatic force

นำ IgG ที่สกัดได้มาผสมกับสารละลายอนุภาคทองคำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 nm (Kestral) ที่ pH 7.4 โดยใช้ IgG ที่ปริมาตรแตกต่างกัน 500 µl จากนั้นบ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที แล้วจึงเติมสารละลาย NaCl 10% W/V 100 µl เพื่อหยุดปฏิกิริยาอนุภาคทองคำที่ไม่ได้จับกับ IgG และบ่มทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นนำไป

อ่านค่า Absorbance ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 – 800 nm เพื่อหาค่า λmax ซึ่งเป็นตัวบอกความยาวคลื่นแสง ที่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ในการประเมินคุณภาพของพันธะระหว่าง IgG และอนุภาคทองคำ

การเชื่อมอนุภาคทองคำด้วยพันธะ neary-covalent

ผสม IgG กับ Sodium periodate (NaIO4) ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาอ๊อกซิเดชั่นกับหมู่ cis-diols และเปลี่ยนหมู่ aldehyde เป็น active aldehydes (–CHO) ทั้งนี้หมู่ (–CHO) จะสามารถทำปฏิกิริยา Coupling กับ Linker (Kumar*et al.,* 2008) ได้ซึ่งในที่นี้ใช้โมเลกุล dithiol aromatic PEG6-CONHNH2 เป็นตัวเชื่อม (Linker) บนIgG นำ IgG-linker ไปผสมกับอนุภาคทอง เพื่อให้เกิดพันธะกึ่งโควาเลนต์ หรือ Nearly-covalent ซึ่งจะทำให้แอนติบอดีและอนุภาคทองคำหลุดออกจากกันได้ยาก และ Blocking บริเวณที่ไม่มี Linker จับด้วยโปรตีน BSA 10% เพื่อป้องกัน Non-specific binding จากนั้นนำไปอ่านค่า Absorbance ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 – 800 nm เพื่อหาค่า λmax และค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ซึ่งเป็นตัวบอกความยาวคลื่นแสง ที่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด เพื่อประเมินคุณภาพของพันธะระหว่าง IgG และอนุภาคทองคำ(Michael I.,2011)

การเตรียมและการประกอบ Immunostrip

ดำเนินการเตรียมแผ่นซับอนุภาคทอง (Conjugate release pad)โดยแช่ในสารละลาย Pretreatment (Conjugate pad pretreatmentbuffer, PBS (0.01 mol/L, pH 8.0), 10% sucrose, 0.05% Tween-20) และ ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง หลังจากนั้นเตรียมสารละลายอนุภาคทอง 10 ml แล้วนำไปผสมกับ IgG-linker500 µl บ่มที่อุณหภูมิห้อง 20 นาทีจากนั้นจึงเติม BSA 10% และนำไปปั่นตกตะกอนและนำตะกอนอนุภาคทองที่เตรียมไว้มาละลายในสารละลายทอง (0.01 mol/L PBS; pH 8.0, 1% concentration BSA, 0.05% PEG) ให้ได้ปริมาตร 600µl ดำเนินการเตรียมแผ่นไนโตรเซลลูโลสโดยขีดเส้น Test line ด้วย IgG Cry9c ความเข้มข้น 2.5 mg/ml และ Control line ด้วย Goat anti-rabit IgG ความเข้มข้น 330 µg/ml แล้วนำไปแช่ใน Blocking buffer (PBS (0.001 mol/L, pH 7.4), 1% concentration BSA) 30 นาที ที่ 37°C และตากให้แห้งที่ 37°C

เมื่อเตรียมอุปกรณ์ทุกอย่างแล้วจึงนำสารละลายทองคำ-แอนติบอดี้ ที่เตรียมไว้มาเข้าเครื่อง Biodot เพื่อพ่นบนแผ่นซับอนุภาคทอง (Conjugate release pad) ที่ 15 µl/cmจากนั้นนำแผ่นทองคำทั้งหมดไปอบที่ 37°C 2 ชม. จนแห้งดำเนินการประกอบแผ่นดูดซับ (Absorbance pad) ไนโตรเซลลูโลสเมมเบรน (NCM) แผ่นซับอนุภาคทอง (Conjugate release pad) แผ่นรับตัวอย่าง (Sample application pad) แผ่นรอง (Backing card) เข้าด้วยกัน โดยเริ่มจากการวางแผ่นไนโตรเซลลูโลสเมมเบรน (NCM) ลงบนแผ่นรอง (Backing card) จากนั้นจึงวางแผ่นซับอนุภาคทอง (Conjugate release pad) ซึ่งได้รับการพ่นอนุภาคทองแล้วด้านล่างของแผ่นเมมเบรนโดยให้เหลื่อมกับแผ่นเมมเบรนประมาณ 1 mm จากนั้นจึงวางแผ่นรับตัวอย่าง (Sample application pad) โดยให้เหลื่อมกับแผ่นซับอนุภาคทอง (Conjugate release pad) ประมาณ 1 mm เช่นกัน และวางแผ่นดูดซับ (Absorbance pad) ด้านบนของแผ่นไนโตรเซลลูโลสเมมเบรน (NCM) โดยให้เหลื่อมกับแผ่นเมมเบรนประมาณ 1 mm เมื่อประกอบเสร็จแล้วจึงนำไปตัดด้วยเครื่อง Biodot เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดกว้าง 0.35 cm เพื่อให้สามารถใส่ลงตลับได้

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดสอบคุณภาพ IgG anti-Cry9cโดย NCM ELISA (Dot blot)

นำ Antiserum 6/2 (เก็บจากเลือดกระต่ายสัปดาห์ที่ 6 ซ้ำที่ 2)มาทดสอบด้วยวิธี NCM ELISA โดยหยด โปรตีน Cry9Cลงบนแผ่นไนโตรเซลลูโลสเมมเบรน (NCM) ช่องละ 5 µl ที่ความเข้มข้น 25ng/µl, 50ng/µl, 75ng/µl, 100ng/µl และความเข้มข้นสุดท้ายที่ 1mg/µl เพื่อตรวจดูปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นโปรตีนสูง จากนั้นทดสอบ Dot blot ด้วย Antiserum 6/2 ที่อัตราส่วน 1: 2,000 พบว่า Antiserum 6/2 สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี สามารถจับกับโปรตีน Cry9Cและตกตะกอนได้ที่ความเข้มข้นทุกค่าความเข้มข้นโดยไม่เกิดปฏิกิริยากับ Buffer negative control และ BSA negative control (Figure 1)

นำ anti-Cry9cIgGที่สกัดได้มาทดสอบเช่นเดียวกันโดยหยด โปรตีน Cry9Cลงบนแผ่น nitrocellulose membrane ช่องละ 5 µl ที่ความเข้มข้น 25ng/µl, 50ng/µl, 75ng/µl, 100ng/µl และ 1 mg/µl จากนั้นทดสอบ Dot blot โดยนำ IgGที่สกัดได้มาเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 1 mg/ml และทดสอบที่อัตราส่วน 1: 2,000 พบว่า IgGที่สกัดได้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีมาก สามารถจับกับโปรตีน Cry9Cและตกตะกอนได้ที่ความเข้มข้นทุกค่าความเข้มข้นโดยไม่เกิดปฏิกิริยากับ Buffer negative control และ BSA negative control (Figure 1) ในส่วนของ Normal serum ไม่พบปฏิกิริยาใดๆเกิดขึ้นแต่ที่โปรตีน Cry9c ความเข้มข้น 1 mg/µlพบว่าเกิดปฏิกิริยาขึ้นเล็กน้อย แต่น้อยมาก (Figure 1)

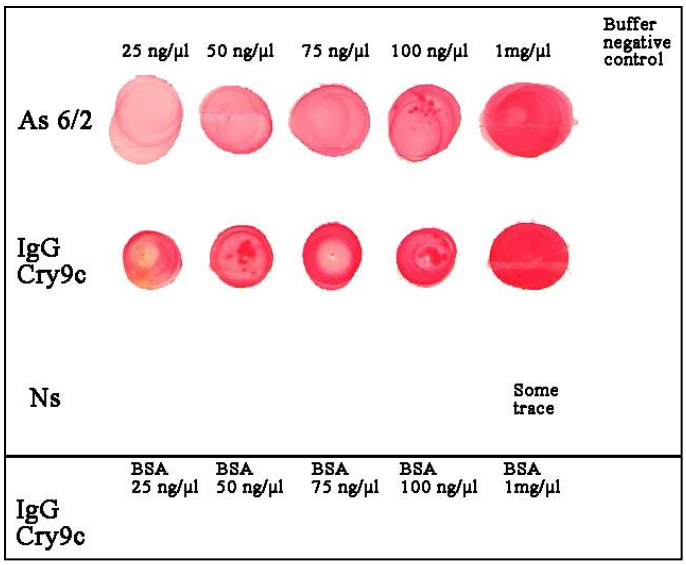


Figure 1แสดงผลการทดสอบปฏิกิริยาระหว่าง โปรตีน Cry9C ความเข้มข้น 25 – 100 ng/µl และ 1 mg/ul ด้วย NCM ELISA (Dot blot) กับแอนติซีรั่มและแอนติบอดี้ As : Antiserum, Ns: Normal serum

การทดสอบความเสถียรของอนุภาคทองคำที่เชื่อมกับแอนติบอดีแล้ว

การทดลองการดูดกลืนความยาวคลื่นช่วงความยาวคลื่นแสง 400 – 800 nm ของอนุภาคทองคำขนาด 40 nm เพื่อเปรียบเทียบความเสถียรของอนุภาคทองคำที่เชื่อมกับแอนติบอดีเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธีปกติโดย Electrostatic force และ การใช้วิธี Nearly-covalent ในการเชื่อมแอนติบอดี้และอนุภาคทองคำ ในส่วนของการเชื่อมแอนติบอดี้และอนุภาคทองคำด้วยวิธี Electrostatic force ดำเนินการโดยผสมแอนติบอดี้ปริมาณ 5 µl (ความเข้มข้น 2.66 mg/ml) (Figure 2)และสารละลายอนุภาคทองคำปริมาตร 1 ml เข้าด้วยกันและบ่มที่อุณภูมิห้อง 20 นาที ทั้งนี้แบ่งชุดการทดลองออกเป็น 6 ชุดการทดลอง คือที่ 4°C ที่ 0 ชม. 24 ชม. และ 48 ชม. และที่อุณหภูมิห้องที่ 0 ชม. 24 ชม. และ 48 ชม. จากนั้นดำเนินการวัด การดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสง 400 – 800 nm (Figure 3, 4)

ในส่วนของการเชื่อมแอนติบอดี้และอนุภาคทองคำด้วยวิธี Nearly-covalent ดำเนินการโดยผสมแอนติบอดี้-linker ปริมาณ 50 µl (ความเข้มข้น 50 µg/ml) และสารละลายอนุภาคทองคำปริมาตร 1 ml เข้าด้วยกันและบ่มที่อุณภูมิห้อง 20 นาที ทั้งนี้แบ่งชุด

การทดลองออกเป็น 6 ชุดการทดลอง คือที่ 4°C 0 ชม. 24 ชม. และ 48 ชม. และที่อุณหภูมิห้องที่ 0 ชม. 24 ชม. และ 48 ชม. จากนั้นดำเนินการวัด UV-Vis spectra ช่วงความยาวคลื่นแสง 400 – 800 nm (Figure 3, 4)

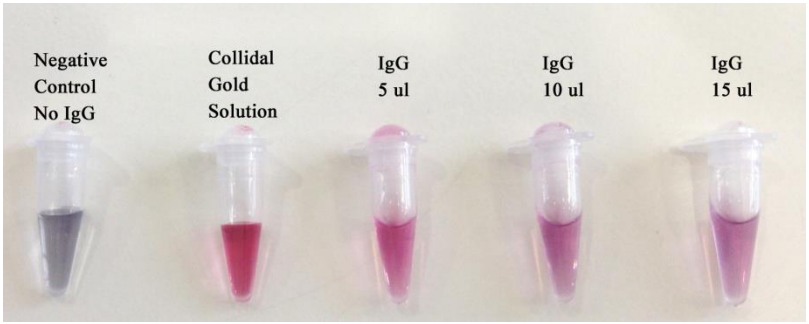


Figure 2 แสดงการทดสอบการเชื่อมแอนติบอดี้และอนุภาคทองคำโดย electrostatic force ที่ความเข้มข้นต่างๆ 5 µl : 13.3 ไมโครกรัม 10 µl : 26.6 ไมโครกรัม และ 15 µl : 39.9 ไมโครกรัม

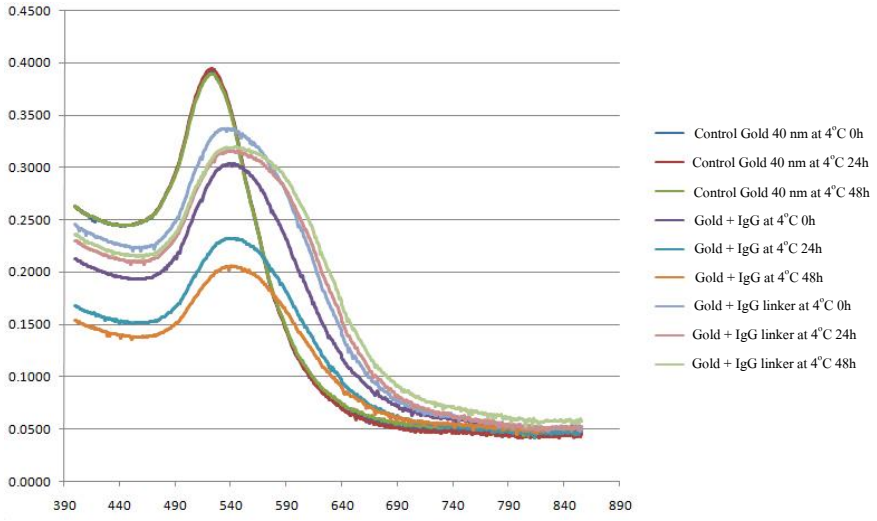


Figure 3แสดงการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงช่วง 400 – 850 nm ที่ 4°C เปรียบเทียบระหว่าง Gold-IgG และ Gold-linker-IgG ซึ่งบ่มไว้ที่ระยะเวลาต่างๆ

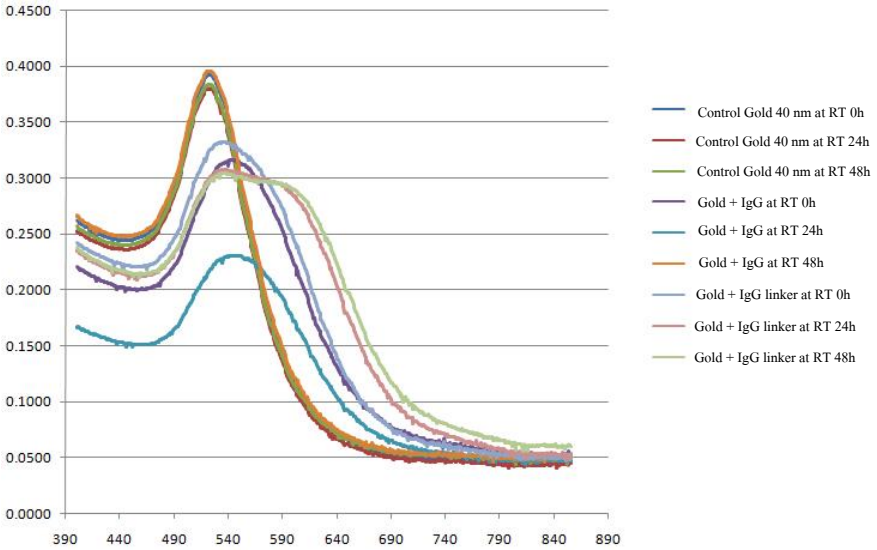


Figure 4 แสดงการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงช่วง 400 – 850 nm ที่อุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบระหว่าง Gold-IgG และ Gold-linker-IgG ซึ่งบ่มไว้ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากกราฟผลการวัดค่า Absorbance UV-Vis spectra ช่วงความยาวคลื่นแสง 400 – 800 nm เปรียบเทียบระหว่าง IgG-linker และ อนุภาคทองคำ และ IgGปกติกับอนุภาคทองคำ ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 0 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง (Figure 3) พบว่าการเชื่อมอนุภาคทองคำกับ IgG-linker มีความเสถียรและมีความหนาแน่นของ IgGบนอนุภาคทองคำมากกว่าการเชื่อมอนุภาคทองคำกับ IgGปกติโดยค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ของการเชื่อม อนุภาคทองคำกับ IgG-linker ที่ เวลา 0 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมงมีค่ามากกว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ของการเชื่อมอนุภาคทองคำกับ IgGปกติและเมื่อเวลาผ่านไปพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของการเชื่อมอนุภาคทองคำกับ IgG-linker ลดลงเล็กน้อยและหยุดอยู่ที่ระหว่าง 0.3155 – 0.3194 ในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ของการเชื่อมอนุภาคทองคำกับ IgGปกติมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วใน 48 ชั่วโมง

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิการเก็บรักษาอนุภาคทองคำที่เชื่อมกับแอนติบอดี้มีผลต่อความเสถียรของแอนติบอดี้บนอนุภาคทองคำด้วย โดยพบว่าการเก็บรักษาอนุภาคทองคำที่เชื่อมกับแอนติบอดี้ที่อุณหภูมิห้องทำให้แอนติบอดี้หลุดออกจากอนุภาคทองคำได้ง่ายและเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 4°C ทั้งสองกรณีคือทั้งการเชื่อมอนุภาคทองคำกับ IgG-linker และ การเชื่อมอนุภาคทองคำกับ IgGปกติ (Figure 3, 4) แต่ในกรณีของการเชื่อมด้วย IgG-linker ก็ยังมีความเสถียรมากกว่า IgGปกติถึงแม้จะเป็นที่อุณหภูมิห้องก็ตามแต่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ของการเชื่อมด้วย IgG-linker หยุดอยู่ที่ 0.341-0.374 ที่ 48 ชั่งโมง (Figure 3) ในขณะที่การเชื่อมด้วย IgG นั้น IgGหลุดออกจากอนุภาคทองคำทั้งหมดที่อุณหภูมิห้อง ที่ 48 ชั่วโมง (Figure 4) โดยค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดกลับไปเท่ากับอนุภาคทองคำ (Control) ที่ 48 ชั่วโมง

การทดสอบปริมาณต่ำสุดที่ชุดตรวจสอบโปรตีนสามารถตรวจพบโปรตีน Cry9c ได้

ดำเนินการทดสอบหาปริมาณต่ำสุดที่ชุด Strip test สามารถตรวจพบโปรตีน Cry9Cได้ โดยเจือจางโปรตีนและทดสอบชุด Strip test จากความเข้มข้น 50 ng/µl, 25 ng/µl, 10 ng/µl, 5 ng/µl, 1 ng/µl (Figure 5)



Figure 5แสดงการทสอบหาปริมาณต่ำสุด (LOD) ที่ชุดตรวจสอบโปรตีน Cry9C

จะสามารถตรวจพบโปรตีน Cry9C และมองเห็นด้วยตาเปล่า

จากการทดลองทดสอบหาปริมาณต่ำสุดที่ชุด Strip test สามารถตรวจพบโปรตีน Cry9Cได้ พบว่าที่ความเข้มข้นของโปรตีน Cry9C10 ng/µl ยังพบ Test-line ปรากฏจางๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าชุด Strip test ตรวจหาโปรตีน Cry9Cสามารถตรวจพบโปรตีน Cry9Cได้ถึงความเข้มข้น 10 ng/µl (Figure 5)เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจนสามารถมองเห็นได้ชัดเจนประมาณ 20 นาทีและเมื่อนำไปเก็บรักษาพบว่าในระยะเวลาสามเดือนชุดตรวจสอบยังสามารถตรวจพบโปรตีน Cry9C ได้ทั้งที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C และ อุณหภูมิห้อง

สรุป

การเชื่อม IgGกับอนุภาคทองคำแบบ Nearly covalent ทำให้พันธะของอนุภาคทองคำและIgGมีความเสถียรกว่าการเชื่อมแบบ Electrostatic forceเมื่อนำไปผลิตเป็นชุดตรวจสอบโปรตีน พบว่าการพ่นอนุภาคทองคำ-IgG ที่อัตรา 15ไมโครลิตร/เซนติเมตร ดีที่สุดทั้งนี้จากการทดสอบปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดที่ชุดตรวจสอบสามารถตรวจพบโปรตีน CRY9C ได้คือ10นาโนกรัม/ไมโครลิตร เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจนสามารถมองเห็นได้ชัดเจนประมาณ 20 นาทีโดยสามารถเก็บชุดตรวจสอบได้เป็นระยะเวลาประมาณ 3 เดือน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

พระราชบัญญัติกักพืชพ.ศ. 2507; (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2542; (ฉบับที่ 3) แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2551

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 215 พ.ศ.2544 เรื่อง กำหนดอาหารที่ห้ามผลิต นำเข้า หรือจำหน่าย โดยให้อาหารที่มีการปนเปื้อนสารพันธุกรรมครายไนน์ซี (Cry9C DNA Sequence) หรือโปรตีนที่สร้างมาจากสารพันธุกรรมนี้ ในข้าวโพดและถั่วเหลือง

Berdal, K.G. and Holst-Jensen A. 2001. Roundup Ready Soybean Event-specific Real-time Qualitative PCR Assay and Estimation of the Practical Detection and Quantification limit in GMO Analysis. **European Food Research and Technology** 213: 432-438.

Investigation of Human Health Effects Associated with Potential Exposure to Genetically Modified Corn. 2001. **A Report to the U.S. Food and Drug Administration from the Centers for Disease Control and Prevention.**

KumarS., Aaron J.andSokolov K. 2008. Directional conjugation of antibodies to nanoparticles for synthesis of multiplexed optical contrast agents with both delivery and targeting moieties. **Nature Protocols** 3: 314 – 320.

Lambert B., Buysse L., Decock C., Jansens S., Piens C., Saey B., Seurinck J., Audenhove K., Rie J., Vliet A. and Peferoen M.1996.A Bacillus thuringiensis insecticidal crystal protein with a high activity against members of the family Noctuidae. **Applied and Environmental Microbiology** 62: 80-86.

Mettler M., Grimm F.,Capelli G., Heinrich Camp. andDeplazes P. 2005. Evaluation of Enzyme-Linked Immunosorbent Assays, an Immunofluorescent-Antibody Test, and Two Rapid Tests Immunochromatographic-Dipstick and Gel Tests) for Serological Diagnosis of Symptomatic and Asymptomatic Leishmania Infections in Dogs.**Journal of Clinical Microbiology** 43: 5515–5519.

Rica d. l., Roberto, Stevens, Molly M. 2012.Plasmonic ELISA for the ultrasensitive detection of disease biomarkers with the naked eye. **Nature Nanotechnology** 7: 821–4.

Michael I. 2011.Covalent gold nanoparticle-antibody conjugates for sensitivity improvement. **A dissertation submitted to the Mathematics, Informatics and Natural Sciences Faculty of Hamburg University**: 1-147.

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์
และวิศวกรรมศาสตร์

Subject: Architecture and Engineering

ภาคบรรยาย

Oral Presentation

การศึกษาแหล่งความร้อนเชิงเหนี่ยวนำเพื่อใช้กับการอบแห้ง

Study of Induction Heating Source for Drying Application

จีระพงศ์ ศรีวิชัย[1*]

Geerapong Srivichai[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแหล่งความร้อนเชิงเหนี่ยวนำสำหรับการอบแห้ง โดยอาศัยอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงให้กับภาระเหนี่ยวนำไปยังแผ่นโลหะ ซึ่งอินเวอร์เตอร์นี้ถูกควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านขาออก แบบการปรับเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณ PWM ทดลองเลื่อนมุมเฟส ตั้งแต่มุม 0 – 180 องศา มีช่วงกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.05 กิโลวัตต์ จะให้อุณหภูมิที่แผ่นโลหะจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณภูมิสุดท้ายเท่ากับ 110 °C ภายในระยะเวลา 2 นาที โดยให้ประสิทธิภาพสูงสุดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 94.12 % และประสิทธิภาพทางความร้อนของแผ่นโลหะเท่ากับ 73.90 %

ABSTRACT

The objective of this research is to study an induction heating system for drying application. The full-bridge inverter is employed to be a high-frequency power source for the inductive load so that the electromagnetic field can be generated and spread through the stainless steel sheet. The output power of the inverter can be controlled by adjusting the phase-shift of the PWM signal, within 0-180 degree. From the experimental results, the temperature of the stainless steel sheet increases from the initial value to the last maximum steady value of approximately 110 °C can be achieved, within 2 minutes of the maximum electrical power input of 1.05 kW. The efficiency of the inverter and the thermal efficiency of the stainless steel sheet are 94.12% and 73.90%, respectively.

Key Words: drying, induction heating, phased-shift PWM

* Corresponding author; e-mail address: **geerapongs@gmail.com**

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร 47160

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Sakonnakhon Campus, 47160

คำนำ

การใช้พลังงานไฟฟ้าให้ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ทำอย่างไรจึงจะคุ้มค่าเกิดผลประโยชน์สูงสุด และประหยัดค่าใช้จ่าย ซึ่งถือว่ามีความสำคัญ และจำเป็นอย่างยิ่ง หากมองถึงภาระทางไฟฟ้าประเภทเครื่องอบแห้งจะเห็นว่ามีอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูงต่อการใช้งานแต่ละครั้ง เนื่องจากการผลิตความร้อนของเครื่องอบแห้งซึ่งนิยมใช้แท่งความร้อน หรือลวดความต้านทาน (Resistance wire) โดยจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านลวดความต้านทานเพื่อเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนจากความต้านทานของขดลวดเองโดยใช้อากาศเป็นตัวพาความร้อนจากตัวลวดความต้านทานไปยังบริเวณต่าง ๆ ภายในเครื่องอบแห้ง ดังนั้นขนาดของลวดความต้านทานจึงมีผลโดยตรงกับมวลการพาความร้อน อีกทั้งการสร้างความร้อนดังกล่าวจะให้ประสิทธิภาพที่ต่ำ สาเหตุมาจากพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งได้สูญเสียไปกับลวดความต้านทานเอง หากพิจารณาพลังงานร่วม อย่างงานวิจัยของธีรเดช และคณะ.(2553) ได้ออกแบบเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหลัก และพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสริมด้วยลวดความต้านทานพิกัดกำลังไฟฟ้า1.6 กิโลวัตต์ จากการศึกษาของอำไพศักดิ์ และ ธนภัทร.(2550) โดยเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด ใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นแท่งรังสีอินฟาเรดขนาด 0.65 กิโลวัตต์กับลวดความต้านทานขนาด 0.8 กิโลวัตต์ และงานวิจัยของภราดร และคณะ.(2557) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเส้นหมี่โคราชด้วยอินฟาเรดร่วมกับลมร้อน กำลังไฟฟ้าของอินฟาเรดมีขนาด 0.6 กิโลวัตต์ และลมร้อนผลิตจากลวดความต้านทานขนาด 5 กิโลวัตต์ นอกเหนือจากการผลิตความร้อนด้วยลวดความต้านทานแล้วนั้น วิธีการผลิตความร้อนอีกรูปแบบหนึ่งถูกพัฒนาขึ้นมา คือวิธีการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ (Induction heating) เป็นการแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเหนี่ยวนำขณะสภาวะเรโซแนนซ์ที่ความถี่เดียวกันส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนบริเวณแผ่นโลหะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ผิวโลหะนั้น สามารถเพิ่มอุณหภูมิขึ้นได้อย่างรวดเร็วและมีความสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่ำ ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการผลิตความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง จากข้อดีของวิธีการผลิตความร้อนดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการผลิตความร้อนเชิงเหนี่ยวนำโดยควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าแบบปรับเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณ PWM มาใช้เพื่อลดอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการผลิตพลังงานความร้อนให้กับการอบแห้งไปทดแทนการผลิตพลังงานความร้อนรูปแบบอื่น ๆ ที่ใช้ไฟฟ้าต่อไป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ความสัมพันธ์ของพลังงาน

พลังงานไฟฟ้านั้นสามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานความร้อนได้ด้วยสมการที่ (1) นั่นคือ

$$P\,t = Q \quad (1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

t คือ ระยะเวลา (s)

พลังงานความร้อนที่วัตถุนั้น ๆ ที่ได้รับจากเหตุผลใด ๆ มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างไรหาได้จากสมการที่ (2)

$$Q = m\,c\,\Delta T \quad (2)$$

เมื่อ Q คือ พลังงานความร้อน (J)

m	คือ มวลของวัตถุ	(kg)
c	คือ ความจุความร้อนจำเพาะ	(J/kg.°C)
ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง	(°C)

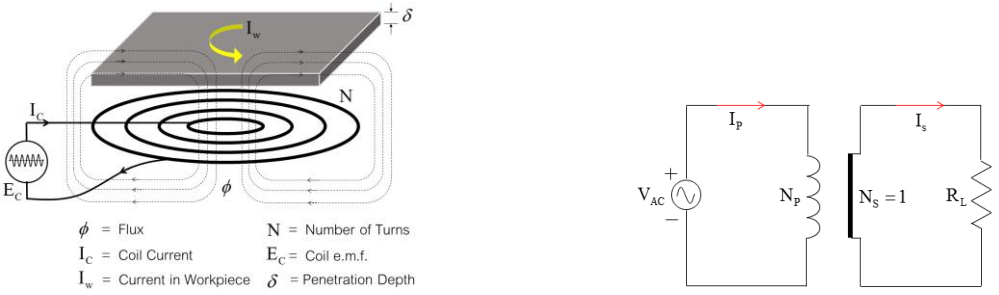
2. พื้นฐานการเกิดความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ

การเกิดความร้อนดังกล่าวนี้จะอาศัยปรากฏการณ์ของการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ปรากฏการณ์ทางผิว และการถ่ายโอนความร้อน (Davies,1979 ; Application notes AN9012, 2000) ซึ่งอธิบายได้เหมือนกับหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าด้านขดลวดทุติยภูมิมีค่าดังสมการที่ (3)

$$I_s = I_p\left(\frac{N_p}{N_s}\right) \tag{3}$$

เมื่อ

I_s	คือ กระแสไฟฟ้าด้านขดลวดทุติยภูมิ	(A)
I_p	คือ กระแสไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิ	(A)
N_s	คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ	(Turn)
N_p	คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ	(Turn)



(a) Induction Heating (b) Secondary short

Figure 1 Basics of Induction Heating

ใน Figure 1 (a) แสดงการให้ความร้อนกับแผ่นโลหะอาศัยการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบทั้งระบบเสมือนหม้อแปลงไฟฟ้าใน Figure 1 (b) ซึ่งขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเสมือนขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีจำนวนรอบเท่ากับจำนวนรอบของขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และแผ่นโลหะเสมือนขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีจำนวนเพียงรอบเดียว โดยความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าด้านขดลวดทุติยภูมิมีค่า

$$I_s = I_p N_p \tag{4}$$

จากสมการที่ (4) จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าด้านขดลวดทุติยภูมิมีค่าแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิ พิจารณา Figure 1 (b) เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ารอบ ๆ ขดลวด ซึ่งจำนวนรอบของการเปลี่ยนแปลงจะแปรผันตรงกับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผันตรงตามปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนบริเวณพื้นผิวของแผ่นโลหะ เกิดการแปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนขึ้นบริเวณผิวโลหะนั้น โดยมีระยะความลึกผิวความร้อนเป็นไปตามปรากฏการณ์ทางผิว (Skin depth effect) ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} \quad (5)$$

เมื่อ δ คือ ความลึกผิว (meters)

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของแผ่นโลหะ (Ω-m)

μ คือ ความซึมซาบของแผ่นโลหะ (Wb/At-m)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

จะเห็นว่าความลึกผิวมีความสัมพันธ์ระหว่างความซึมซาบของแผ่นโลหะกับอุณหภูมิ ความเข้มสนามแม่เหล็ก และความถี่ (Davies and Simpson, 1979) จากปรากฏการณ์ทางผิวนี้แสดงได้ว่าความร้อนเปลี่ยนรูปได้จากพลังงานไฟฟ้าร่วมกันทำให้ได้พลังงานบริเวณพื้นผิวโลหะ ดังนั้นโลหะประเภทที่เกิดการเหนี่ยวนำได้ดีควรมีค่าความลึกผิวที่ต่ำ มีค่าซึมซาบได้สัมพัทธ์และมีค่าความต้านทานจำเพาะสูงจึงไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณความถี่สูงมากก็สามารถเกิดความร้อนได้ดี จากงานวิจัย Young-Sup et al, (1999) และ Yuki et al, (2008) พบว่าเหล็กและสแตนเลส มีคุณสมบัติดีกว่าทองแดง และอลูมิเนียม ที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์ โดยให้ค่าความลึกผิวเท่ากับ 0.11 mm.

3. หลักการของวงจรเรโซแนนซ์

การแปรเปลี่ยนจุดความถี่เรโซแนนซ์เนื่องจากความร้อนของแผ่นโลหะที่สูงขึ้นในสภาวะเรโซแนนซ์ของวงจรR L C พบว่าที่ความถี่ค่าหนึ่งโดย $X_L = X_C$ มีผลให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำสุด นั่นคือ $Z = R + j(X_L - X_C) = R$ ส่งผลให้เกิดกระแสไหลในวงจรสูงสุด โดยความถี่เพิ่มขึ้นทำให้ X_L เพิ่มเป็นเชิงเส้น ในทางกลับกันค่า X_C จะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แต่ค่า X_C จะเท่ากับศูนย์ ผลรวมของรีแอคแตนซ์ ซึ่งหาความถี่เรโซแนนซ์ ได้จากสมการ

$$X_L = 2\pi f L \quad (6)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (7)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L C}} \quad (8)$$

สมการที่ (8) ความถี่เรโซแนนซ์ f_r มีความสัมพันธ์กับค่าความนำของภาระจากการเปลี่ยนขดลวดเหนี่ยวนำกับแผ่นโลหะ และค่าความเหนี่ยวนำของภาระยังได้รับผลจากค่าความซึมซาบที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นของแผ่นโลหะ (Shigehiro and Minoro,1996)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. ชุดทดลอง

1.1 งานวิจัยนี้ใช้แผ่นโลหะตัวอย่างประเภท Stainless steel – Grade 304 มีขนาด 0.2 × 0.3 × 0.05 m^3 โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแผ่นโลหะ คือความจุความร้อนจำเพาะของแผ่นโลหะเท่ากับ 530 J/kg.°C ความหนาแน่นเท่ากับ 8,060 kg/m^3 และปริมาตรของแผ่นโลหะเท่ากับ 3×10^{-4} m^3 ให้อุณหภูมิสุดท้ายบนแผ่นโลหะเท่ากับ 120 °C แทนในสมการที่ (2) จะได้พลังงานความร้อนของแผ่นโลหะเท่ากับ 121,746 J คำนวณหา

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นโลหะจาก 25 °C ถึง 120 °C ภายในระยะเวลา120 นาที จะได้กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อนเท่ากับ 1.01 กิโลวัตต์

1.2 ภาระวงจรเรโซแนนซ์ ประกอบด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ใช้ลวดตัวนำทองแดงเบอร์ 30 SWG. มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.314 mm.จำนวน 40 เส้นพันตีเกลียวเข้าด้วยกันเพื่อลดปรากฏการณ์ทางผิวตัวนำเนื่องจากความถี่ใช้งานโดยเส้นผ่านศูนย์กลางรวมกัน 2.5 mm.หลังจากนั้นนำลวดที่ตีเกลียวแล้ว ออกแบบการพันเป็นวงขด (Spiral coil) จำนวน 30 รอบการพัน วัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดดังกล่าวด้วยเครื่องวัด RLC ถูกวางอยู่ภายใต้แผ่นโลหะที่ระยะห่าง 10 mm. ส่วนการหาค่าความจุของคาปาซิเตอร์โดยกำหนดความถี่ใช้งานประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์ คำนวณจากสมการที่ (8)-(10) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเท่ากับ 0.24 mH และค่าความจุคาปาซิเตอร์เท่ากับ 0.33 μF จากนั้นอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ออกแบบสร้างขึ้นจะถูกนำมาต่อเป็นภาระในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

1.3 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูงอาศัยอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์เพื่อสร้างรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 10 - 30 กิโลเฮิรตซ์ ควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยนำเทคนิคการปรับเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณ PWM พิจาณาจาก (Mollov et al, 2004 ; Kifune et al, 2004 ; Yuki et al, 2008) ด้วยไอซีสำเร็จรูปเบอร์ UC 3879N ไปขับสวิตซ์ไอจีบีทีในวงจรอินเวอร์เตอร์ กำหนดให้ช่วงพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 1 กิโลวัตต์

1.4 อุปกรณ์ และเครื่องมือวัด ประกอบไปด้วย เครื่องวัดอุณหภูมิ (Infrared thermometers : UT303C) ช่วงการวัด -32 ~ 1050°C เครื่องวัดรูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้า (Oscilloscope : Tektronix TD 2014B) พร้อมทั้งสายวัดแรงดัน และโพรบวัดกระแสไฟฟ้า (Tektronix : A621 AC current probe) เครื่องบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า (Power logger, Fluke model :1735) สำหรับวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบทั้งหมด

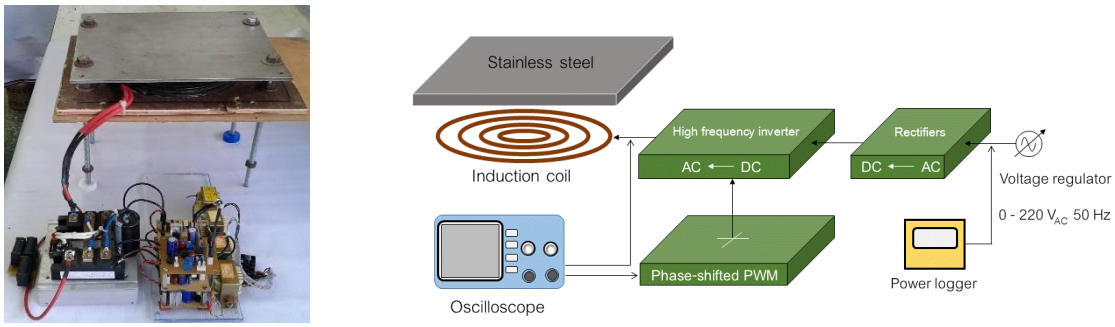


Figure 2 Schematic diagram of induction heating

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ทดลองปรับเลื่อนมุมเฟสด้านขาออกของไอซีกำเนิดสัญญาณ PWM โดยเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณครั้งละ 30 องศา (0 , 30 , 60 , 90 , 120 , 150 และ 180 องศา) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ โดยบันทึกการวัดรูปคลื่นสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป

2.2 ประเมินประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ในสมการที่ (9)

$$\eta_{\text{Inverter}} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าขาออกอินเวอร์เตอร์ (kW)}}{\text{กำลังไฟฟ้าขาเข้าอินเวอร์เตอร์ (kW)}} \times 100\ \% \qquad (9)$$

2.3 ทดลองการเหนี่ยวนำความร้อนให้กับแผ่นโลหะ ดังผังใน Figure 2 โดยวัดอุณหภูมิที่แผ่นโลหะด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลตรวจวัดบนระนาบของแผ่นโลหะทั้งหมด 9 ตำแหน่ง ที่แสดงใน Figure 3 โดยจะนำอุณหภูมิทั้ง 9 ตำแหน่งไปเฉลี่ยเพื่อนำข้อมูลไปคำนวณหาพลังงานความร้อนที่แผ่นโลหะต่อไป

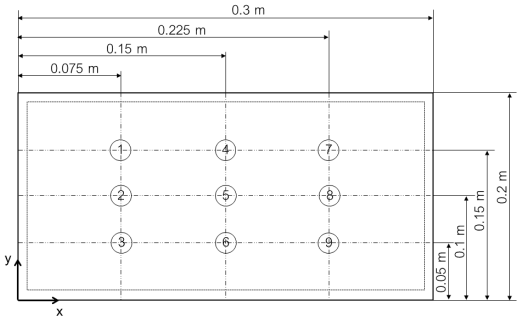


Figure 3 Temperature measurement positions

2.4 ประเมินประสิทธิภาพทางความร้อนของแผ่นโลหะด้วยสมการที่ (10)

$$\eta_{Heat} = \frac{\text{พลังงานความร้อนของแผ่นโลหะ (kW)}}{\text{กำลังไฟฟ้าขาเข้าของเครื่อง (kW)}} \times 100\ \% \qquad (10)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลการปรับเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณ PWM ใน Figure 4 (a) – (g) แสดงให้เห็นว่าสัญญาณขับสวิตช์ถูกเลื่อนมุมเฟสครั้งละ 30 องศา ส่งผลให้แรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ขณะเรโซแนนซ์ที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิรตซ์ ดัง Figure 5 (a) – (g) เมื่อปรับเลื่อนมุมเฟสเข้าใกล้มุม180 องศา ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์มีค่าลดลงจึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ลดลงตามไปด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าตัวประกอบกำลัง (pf.) ใน Figure 6 พบว่าค่าตัวประกอบกำลังค่อนข้างดีแม้ว่าจะปรับเลื่อนมุมเฟสเข้าใกล้มุม 150 องศาก็ตาม กระบวนการนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นผลให้อุณหภูมิของแผ่นโลหะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งผลทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yuki et al, (2008)

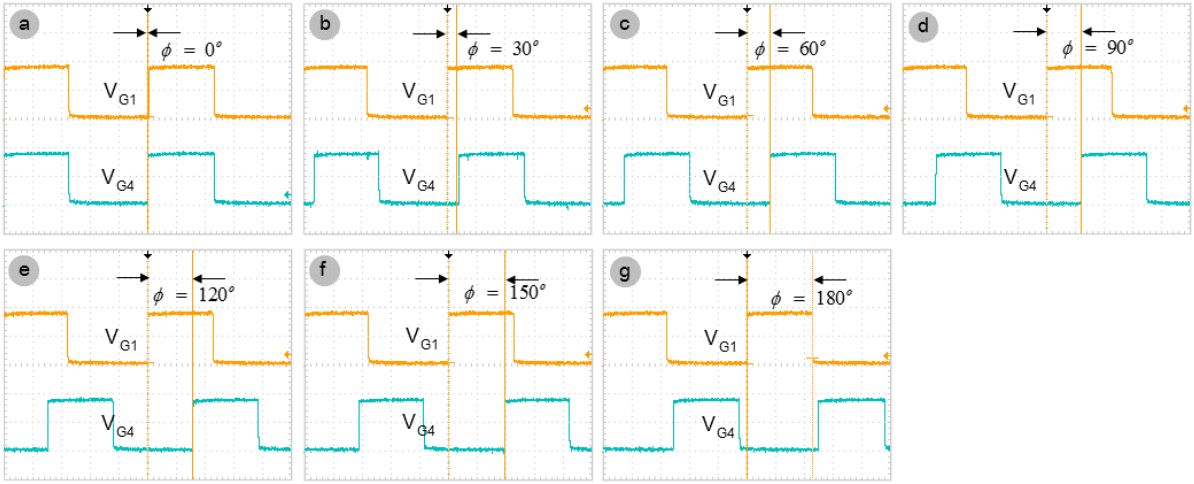


Figure 4 Experimental waveforms of V_{G1} and V_{G4} for the phase shifted 0° - 180°

(V_{G1} = V_{G4} = 2 V/div ; Time = 10 μs /div)

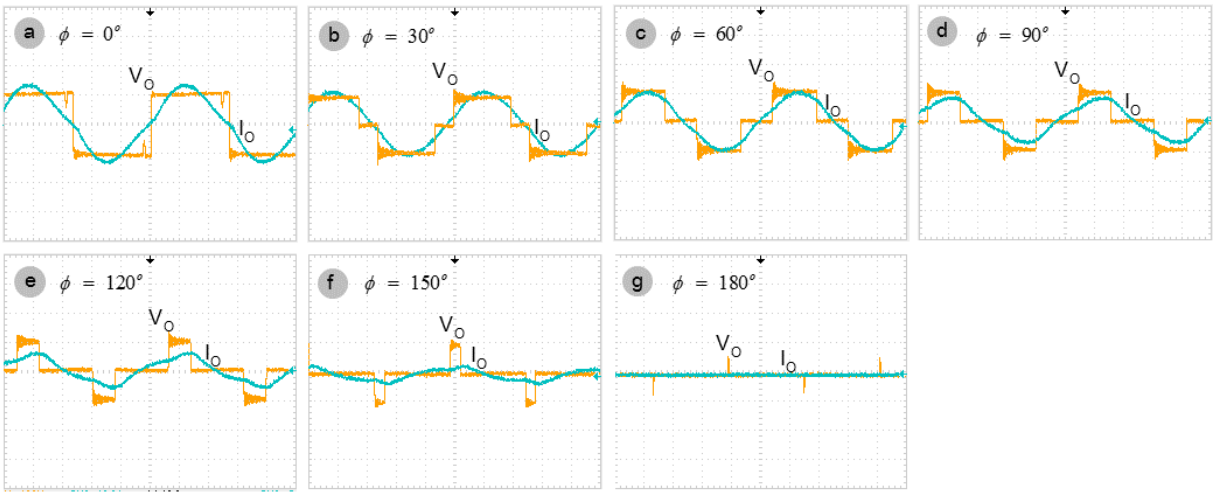


Figure 5 Experimental waveforms of V_O and I_O for the phase shifted 0° - 180°

(V_O = 100 V/div ; I_O = 10 A/div ; Time = 10 μs/div)

3.2 ประเมินประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ ที่มุมการเลื่อนเฟสต่าง ๆ แสดงใน Figure 7 พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องนี้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 94.12 % แต่จะมีค่าลดลงตามการเลื่อนมุมเฟสที่เพิ่มขึ้น

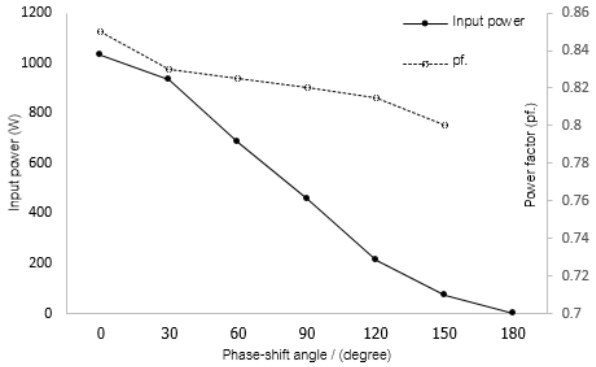


Figure 6 Input power regulation performance

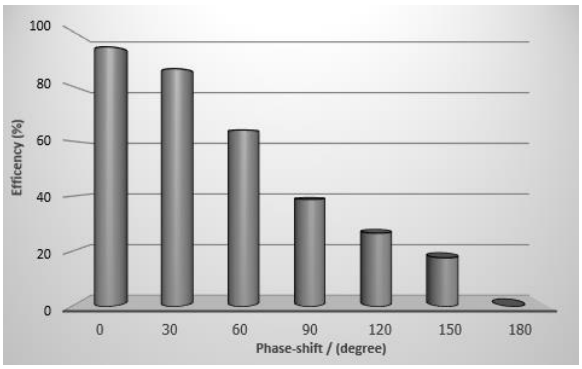


Figure 7 Test efficiency of inverter

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแผ่นโลหะกับกำลังไฟฟ้าด้านขาเข้า ที่มุมเลื่อนเฟสต่าง ๆ ใน Figure 8 พบว่าแผ่นโลหะมีอุณหภูมิสูงสุด (T_o) เท่ากับ 110 °C ภายในระยะเวลา 2 นาที ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าด้านขาเข้าเท่ากับ 1.05 กิโลวัตต์ โดยประสิทธิภาพทางความร้อนของแผ่นโลหะ ใน Figure 9 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 73.9 % จะเห็นว่ามีค่าต่ำกว่าที่คำนวณเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการสูญเสียในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการสวิตช์ ดังนั้นผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งผลิตอากาศร้อนให้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่อไป

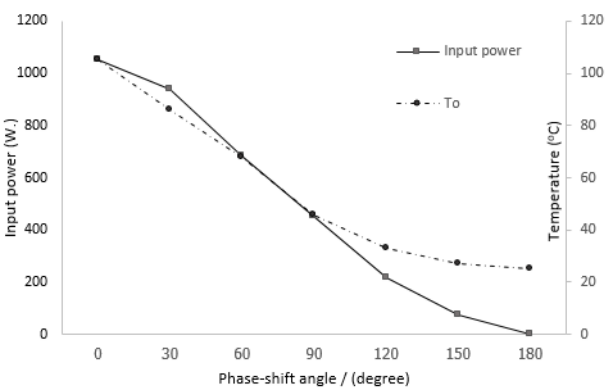


Figure 8 Input power with temperature

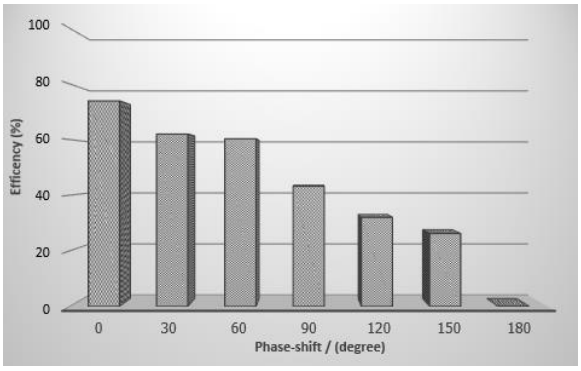


Figure 9 Test efficiency of heating

สรุป

การศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่าการให้ความร้อนเชิงเหนี่ยวนำให้กับแผ่นโลหะขนาด $0.2 \times 0.3 \times 0.05\ m^3$ สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ ได้ในช่วงตลอดการทำงาน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นบนแผ่นโลหะจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณภูมิสุดท้ายมีค่าเท่ากับ $110^{\circ}C$ ภายในระยะเวลา 2 นาที ที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.05 กิโลวัตต์ โดยจะให้ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์และประสิทธิภาพทางความร้อนของแผ่นโลหะเท่ากับ 94.12 % และ 73.90 % ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่อนุญาตให้ใช้ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าสำหรับทดลองงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ภราดร หนูทอง, ไพรัชต์ ดิฐคณารักษ์กุล, สุนิสา จีนแสร์ และ วิลาวัณย์ เพื่อนสงคราม.2557. จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเส้นหมี่โคราชด้วยอินฟาเรดร่วมกับลมร้อน. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่** 21(2):76-86

ธีรเดช ใหญ่บก, สุวิทย์ เพชรห้วยลึก, จอมภพ แววศักดิ์, มานีนา มะหนิ และ ภรพนา บัวเพชร์. 2553. การพัฒนากระบวนการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าภายใต้สภาพภมิอากาศภาคใต้ของประเทศไทย. **วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ** 12(3): 109-118

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และ ธนภัทร สุวรรณกูฏ. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด.วารสารวิศวกรรม มข. 34(2): 189-201

Application notes AN9012, 2000. **Induction heating system topology review.** Fairchild Semiconductor.

Davies E.J.,and Simpson P., 1979. **Induction heating handbook**. McGraw-Hill,UK.

Kifune H.,Hatanaka Y.and Nakaoka M. 2004. Cost effective phase shifted pulse modulation soft switching high frequency inverter for induction heating applications. **IEE Proc.-Electr.Power** 151 (1) pp.19-25

Mollv S.V.,Theodoridis M.and Forsyth A.J. 2004. High frequency voltage-fed inverter with phase-shift control for induction heating. **IEE Proc.-Electr.Power** 151 pp.12-18

Shigehiro Y., and Minoro A., 1996. A 50-450 kHz Half-Bridge Inverter for induction heating applications. **IEEE Trans.Ind. Electron** 43 (1) pp.192-201

Yuki K., Eiji H., Toshihiko T., and Mutsuo N. 2008. Basic study of a phase-shifted soft switching high - frequency inverter with boost PFC converter for induction heating. **Journal of Power Electronics** 8 : (2) 192-199

สมบัติความเสียดทานและการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบฟีนอลิกที่เติมผงเถ้าจากธรรมชาติ

Friction and Wear Properties of Natural Ash-Filled Phenolic Based Composites

เสาวภา ชูศรี[1,*], เอกชัย วิมลมาลา[1], ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ[1] และ ศิรินทร ทองแสง[2]

Saowapa Choosri[1,*], Ekachai Wimolmala[1], Narongrit Sombatsompop[1] and Sirinthorn Thongsang[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของผงเถ้าจากธรรมชาติประกอบด้วยเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยที่มีผลต่อสมบัติความเสียดทานและการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบฟีนอลิก โดยมีการนำผงเถ้ามาใช้แทนที่ผงอะลูมินาและผงซิลิกาที่เป็นวัสดุขัดถูในชิ้นงานด้วยปริมาณ 0, 4, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เตรียมชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ทดสอบวัดค่าความแข็ง ความทนแรงกดอัด วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภายในชิ้นงาน และสมบัติไตรโบโลยีด้านความเสียดทานและการสึกหรอที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 150 องศาเซลเซียส ผลการวิจัย พบว่า การเติมผงเถ้าจากธรรมชาติส่งผลทำให้ความแข็งมีแนวโน้มลดลง ส่วนความทนแรงกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงในทุกอุณหภูมิทดสอบ สำหรับความต้านทานการสึกหรอที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของชิ้นงานที่เติมผงเถ้าในช่วง 0-12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 100 และ 150 องศาเซลเซียส ชิ้นงานที่เติมผงเถ้ามีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้า

ABSTRACT

This article studied the effect of natural ash (fly ash and bagasse ash) on the friction and wear properties of phenolic based composites. The natural ash replaced alumina and silica as abrasive materials in the composites with ash content of 0, 4, 8 and 12 wt% The composites were prepared by hot press at 170°C. The properties of phenolic based composites were examined, including hardness, compressive strength, and microstructural analysis. Tribological properties of the composites in terms of the coefficient of friction and wear rate at 25, 100 and 150°C were studied. It was found that the addition of natural ash led to a reduction of the hardness and an increase in compressive strength of composites. The coefficient of friction of the phenolic based composites did not change with ash loading at all test temperature. The wear resistance at 25°C for the phenolic based composites was stable at 0-12 wt% of ash, while the wear resistance at 100 and 150°C of the composites loaded with natural ash particles was superior to those of the composites without ash.

Key Words: Phenolic / Natural ash / Tribological / Wear

* Corresponding author; e-mail address: kwang211033@hotmail.com

[1]กลุ่มวิจัย P-PROF คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[1]P-PROF research group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[2]Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

คำนำ

อุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรคมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมรถยนต์ ระบบเบรคเป็นส่วนที่สำคัญในด้านความปลอดภัยของรถยนต์ โดยมีผ้าเบรคเป็นตัวสร้างแรงเสียดทานกับจานเบรคเพื่อชะลอและหยุดการหมุนของล้อ กล่าวคือ ในขณะที่ออกแรงเหยียบที่แป้นเบรค แรงเหยียบถูกส่งไปที่แม่ปั๊มน้ำมันเบรค (Master cylinder) เพื่อทำหน้าที่อัดแรงดันน้ำมันเบรคออกไปตามระบบเบรคไปจนถึงตัวเบรค เมื่อเบรคได้รับแรงดัน ลูกปั๊มน้ำมันเบรคดันให้ผ้าเบรคเสียดทานกับชุดจานเบรคที่อยู่ใกล้กับจานดิสก์เบรคหรือดรัมเบรค เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานทำให้ล้อหมุนช้าลง เมื่อเพิ่มน้ำหนักเหยียบเบรค แรงดันน้ำมันเบรคเพิ่มมากขึ้น มีความฝืดที่ล้อเพิ่มขึ้น รถจึงสามารถหยุดได้ตามความต้องการของผู้ขับขี่ (John Remling,1928) ในปัจจุบันกระบวนการผลิตผ้าเบรคงานอุตสาหกรรมมีการใช้วัสดุที่มีส่วนผสมของสารฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (Binder) ยึดส่วนประกอบต่างๆ ภายในผ้าเบรค ได้แก่ สารหล่อลื่นชนิดของแข็ง สารเสริมแรง และวัสดุขัดถูอื่นๆ (ดารณี เจริญสุข, 2555) แต่เดิมผ้าเบรคมีส่วนผสมที่สำคัญคือสารแอสเบสตอส (Asbestos) เนื่องจากมีราคาถูก เบรคเสียงเงียบ เพิ่มความแข็งและความฝืดให้กับผ้าเบรค พบว่าฝุ่นผงของสารแอสเบสตอสที่เกิดจากการสึกหรอของผ้าเบรคส่งผลทำให้เกิดมะเร็งในปอดเป็นอันตรายต่อสุขภาพ จึงมีการหลีกเลี่ยงการใช้สารแอสเบสตอสเป็นส่วนผสมในการผลิตผ้าเบรค ทำให้ผู้ผลิตผ้าเบรคเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมเสริมแรงเป็นชนิดอื่น เช่น เส้นใยแก้ว โลหะ อะรามิด และเซรามิก เป็นต้น (D. Chan and G.W. Stachowiak, 2004)

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาสารตัวเติมที่มาจากธรรมชาติโดยใช้เถ้าลอยและเถ้าชานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติและเป็นสารตัวเติมที่มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา (Silica, SiO_2) และอะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) (S. Thongsang *et al*., 2012; S. Kanking *et al*., 2012) ซึ่งมีค่าความแข็งค่อนข้างสูงสำหรับใช้เป็นวัสดุขัดถูที่สามารถช่วยชะลอการสึกหรอของผ้าเบรคได้ (Mustafa Boz, 2007) ดังนั้นจึงนำไปสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของผงเถ้าจากธรรมชาติที่มีต่อสมบัติความเสียดทาน และการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบฟีนอลิกที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิสูง (100 และ 150 องศาเซลเซียส) และนอกจากนี้เป็นการพัฒนาการผลิตผลิตภัณฑ์ผ้าเบรคที่มีประสิทธิภาพและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly) ด้วย (R. Yun *et al*., 2010)

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นงานเริ่มต้นจากการผสมส่วนผสมทั้งหมดตามอัตราส่วนที่ต้องการดังแสดงในตารางที่ 1 ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) จากนั้นนำส่วนผสมไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบแท่งรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25 x 25 x 7 มิลลิเมตร^3 (มอก. 97-2536) โดยมีขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจากกระบวนการอัดแห้ง จากนั้นนำชิ้นงานอัดซ้ำด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot press) โดยใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส โดยทำการอัดขึ้นรูปร้อนขั้นที่ 1 ด้วยความดัน 100 บาร์ เป็นเวลา 15 นาที และอัดขึ้นรูปร้อนขั้นที่ 2 ด้วยความดัน 140 บาร์ เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำชิ้นงานหลังการขึ้นรูปร้อนไปอบด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานปรับแต่งผิวหน้าโดยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100-320 ความหยาบผิวของชิ้นงานประมาณ 5.2 μm (ไมครอน) แล้วจึงทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติไตรโบโลยีต่อไป

Table 1 Material formulations of phenolic based composites

Materials	Functions	Content (wt%)
Phenolic resin	Matrix	50
Chopped fiber (S-glass)	Reinforcement	15
Graphite (75-100 μm)	Solid lubricant	3
Silicon carbide (75-100 μm)	Friction modifier	8
Barium sulfate (75-100 μm)	Filler	12
Abrasives* (75-100 μm): Natural ash** (75-100 μm)	Abrasives	12:0, 8:4, 4:8, 0:12

*Alumina/silica, **Fly ash and Bagasse ash

การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ความแข็ง (Hardness)

การทดสอบความแข็ง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E384-2003 ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิคเกอร์ระดับจุลภาค (Micro-Vickers hardness tester) บริษัท Future-Tech รุ่น FM-700e Type D ประเทศญี่ปุ่น ใช้แรงกด 50 gf (กรัมแรง) เวลากด 10 วินาที

มอดุลัสการกดอัดและความแข็งแรงกดอัด (Compressive modulus and compressive strength)

การทดสอบมอดุลัสการกดอัดและความแข็งแรงกดอัด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5467-2010 ด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine บริษัท LLOYD รุ่น LR 50K ประเทศอังกฤษ ความเร็วในการทดสอบ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที กำหนดเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่ 40%

การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอ (Friction coefficient and wear)

การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอ โดยใช้เครื่องทดสอบไตรโบมิเตอร์ที่อุณหภูมิสูง (High temperature tribometer) บริษัท CSM-instruments รุ่น High temperature tribometer ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ด้วยรูปแบบ Pin-on-disc กำหนดชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบเป็นพิน (Pin) ปลายทรงกรวยหัวตัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวพิน 2.5 มิลลิเมตร คู่สัมผัส (Disc) เป็นเหล็กหล่อ เกรด FCD450 ความหยาบผิว 0.3-0.4 μm ในการทดสอบใช้ความเร็วในการทดสอบ 37.7 เซนติเมตรต่อวินาที แรงกด 1 นิวตัน ระยะทาง 1 กิโลเมตร ทดสอบ ณ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6610LV ประเทศญี่ปุ่น เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวและการยึดเกาะของอนุภาคสารตัวเติมกับเนื้อเมทริกซ์ภายในชิ้นงานทดสอบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการเติมผงเถ้าจากธรรมชาติที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบฟีนอลิก

ความแข็ง (Hardness)

จากรูปที่ 1 แสดงสมบัติเชิงกลด้านความแข็งของชิ้นงาน ซึ่งเป็นความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่ทำการเติมผงเถ้าจากธรรมชาติ ประกอบด้วยเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยที่ปริมาณ 0-12 wt% พบว่า เมื่อเติมผงเถ้าในชิ้นงานส่งผลทำให้ความแข็งที่ผิวของชิ้นงานมีแนวโน้มต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้า โดยชิ้นงานที่เติมเถ้าลอยนั้นเห็นการลดลงของค่าความแข็งอย่างชัดเจน ที่ปริมาณการเติมเถ้าลอยที่ 12 wt% ในขณะที่การเติมเถ้าชานอ้อยมีการลดลงที่ปริมาณ 8-12 wt% ทั้งนี้เนื่องจากผงเถ้าทั้งสองชนิดที่ทดแทนผงอะลูมินาและผงซิลิกานั้น มีค่าความแข็งเริ่มต้นของอนุภาคผงน้อยกว่า โดยค่าความแข็งเริ่มต้นของผงอะลูมินาและผงซิลิกาตามโมฮ์สเกลมีค่าเท่ากับ 9 และ 7 ตามลำดับ (W.Österle *et al*, 2014) ส่วนในกรณีของสารตัวเติมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยมีค่าความแข็งเริ่มต้นตามโมฮ์สเกลเท่ากับ 6 (D. Chan and G.W. Stachowiak, 2004; V.S. Aigbodion, 2010) จึงส่งผลทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานโดยรวมไม่ต่างกัน

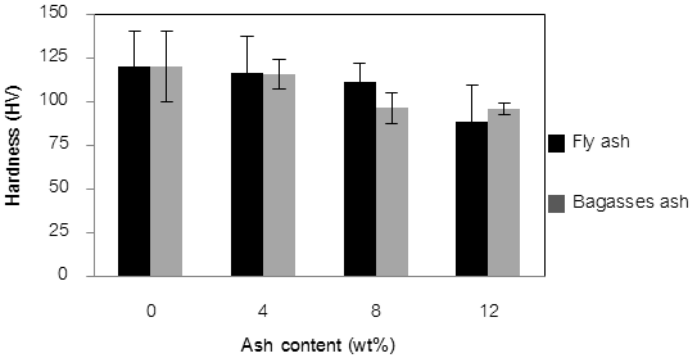


Figure 1 Hardness of phenolic based composites with ash content

มอดุลัสการกดอัดและความต้านทานแรงกดอัด (Compressive modulus and compressive strength)

ค่ามอดุลัสการกดอัดของชิ้นงานที่ทำการเติมผงเถ้าทั้งสองชนิด แสดงดังรูปที่ 2 โดยค่ามอดุลัสการกดอัดนั้นแสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) พบว่า เมื่อปริมาณการเติมผงเถ้าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสการกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เพราะค่ามอดุลัสการกดอัดนั้นเป็นผลช่วงที่แรงกดเข้าไปทำให้โครงสร้างภายในของชิ้นงานเกิดการบีบอัดและสามารถคืนกลับตัวได้ แต่เมื่อได้รับแรงเพิ่มขึ้นอนุภาคผงและองค์ประกอบภายในเกิดการเรียงชิดติดกันมากขึ้น หลังจากนั้นเมื่อถึงจุดหนึ่งอนุภาคผงและเนื้อเมทริกซ์เกิดการเลื่อนผ่านกัน ส่งผลทำให้เกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) แสดงถึงค่าความต้านทานแรงกดอัดของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3 สังเกตเห็นว่า ค่าความต้านทานแรงกดอัดของชิ้นงานเมื่อทำการเติมเถ้าลอยลงไปในชิ้นงาน พบว่า ค่าความต้านทานแรงกดอัดของชิ้นงานที่เติมผงเถ้าทั้งสองชนิดในปริมาณ 4 wt% ส่งผลทำให้ค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้าเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการเติมเถ้าลอยเพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกดอัดไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 4 โดยที่เถ้าลอยมีลักษณะทรงกลมและผิวเรียบดังแสดงในรูปที่ 4a) เถ้าชานอ้อยมีลักษณะเป็นแท่งและมีรูพรุนที่ผิว ดังแสดงในรูปที่ 4b) และสารตัวเติมผงอะลูมินา ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4c)

และพบว่า การยึดเกาะกันระหว่างเถ้าลอยกับเนื้อเมทริกซ์มีการยึดเกาะที่ดีดังแสดงในรูปที่ 5a) ในกรณีการเติมเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าชานอ้อยนั้นเป็นอนุภาคที่มีลักษณะเป็นแท่งและมีความเป็นรูพรุนที่ผิว จึงส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างเถ้าชานอ้อยกับเนื้อเมทริกซ์เกิดได้ดี โดยเนื้อเมทริกซ์สามารถแทรกตัวเข้าไปภายในรูพรุนที่ผิวของเถ้าชานอ้อยได้ดังแสดงในรูปที่ 5b) ในลักษณะของการยึดเกาะกันทางกล (Mechanical interlocking) (D.N.U. Lan *et al*, 2012) ลักษณะการกระจายตัวของเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยภายในชิ้นงาน ส่วนผสมสามารถกระจายตัวได้ค่อนข้างดี ส่งผลทำให้ภายในเนื้อชิ้นงานมีการยึดเกาะกันของอนุภาคผงกับเนื้อเมทริกซ์ ทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านทานต่อแรงกด เนื้อวัสดุเกิดการต้านแรงกดที่ได้รับจนถึงจุดหนึ่งที่แรงกดสามารถทำลายแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคผงกับเนื้อเมทริกซ์ได้ ส่งผลต่อชิ้นงานเกิดการเสียรูปอย่างถาวรและเกิดการแตกหักแบบเปราะขึ้นภายในชิ้นงาน

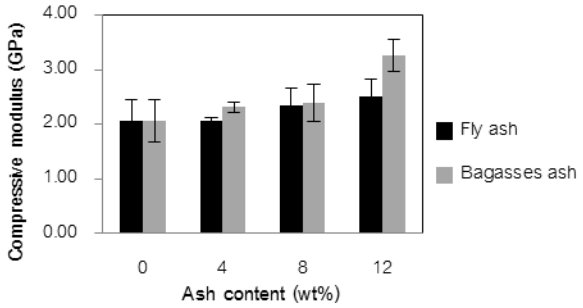


Figure 2 Compressive modulus of phenolic based composites with ash content

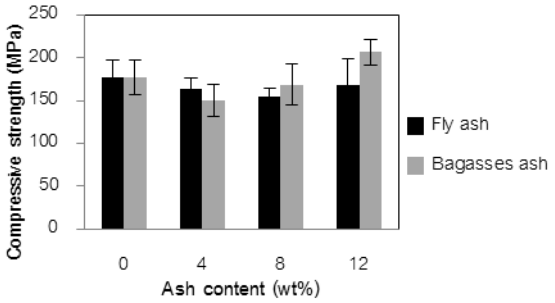


Figure 3 Compressive strength of phenolic based composites with ash content

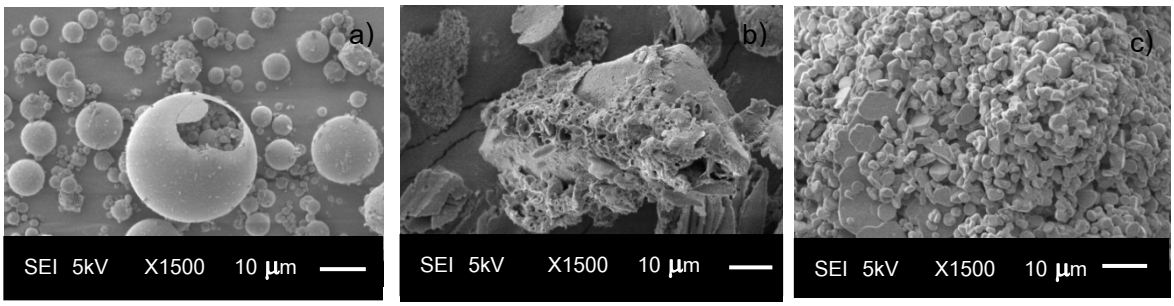


Figure 4 SEM pictures of materials (1500x) note: a) fly ash, b) bagasse ash and c) Alumina

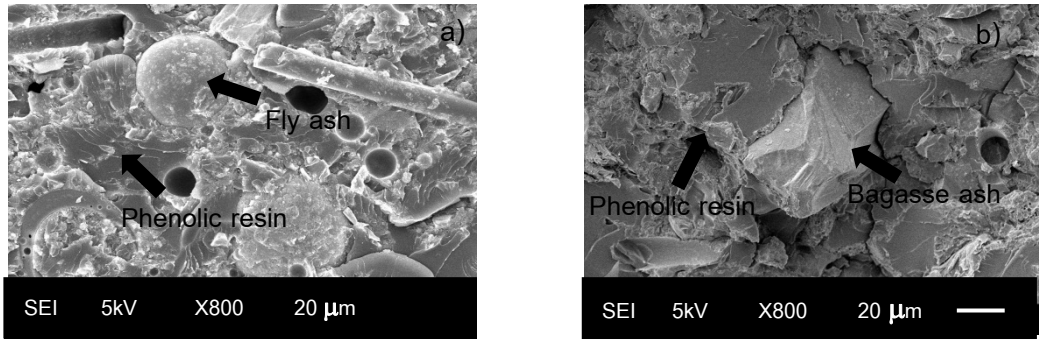


Figure 5 SEM micrograph of phenolic based composites (800x)

note: a) 8% fly ash and b) 8% bagasse ash

ผลของการเติมผงเถ้าจากธรรมชาติที่ส่งผลต่อสมบัติไตรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบฟีนอลิก

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction)

จากรูปที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานที่ทำการเติมผงเถ้าและไม่เติมผงเถ้า โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิสูง (100 และ 150 องศาเซลเซียส) พบว่า เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้าและเติมผงเถ้าทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงส่งผลทำให้เนื้อเมทริซ์เกิดการอ่อนตัวและทำให้การยึดเกาะระหว่างเนื้อเมทริกซ์กับอนุภาคผงเกิดน้อยลง ดังนั้นเมื่อเกิดการเสียดสีกับวัสดุคู่สัมผัส อนุภาคผงต่างๆ ในชิ้นงานจึงหลุดออกได้ง่ายขึ้น ทำให้เศษของการสึกหรอที่มีความแข็งสูงเข้าไปแทรกระหว่างคู่ผิวสัมผัสในลักษณะอนุภาคที่สาม (Third body) และเกิดความเสียดทานแนบติด (Adhesive friction) ร่วมด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohan *et al*., 2014

อัตราการสึกหรอ (Wear rate)

อัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่เติมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งประกอบด้วยอัตราการสึกหรอที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิสูง (100 และ 150 องศาเซลเซียส) จากการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อทำการเติมผงเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อย ส่งผลทำให้ค่าอัตราการสึกหรอไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อทำการทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง พบว่าค่าอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบ เพราะเนื้อเมทริกซ์เกิดการอ่อนตัวซึ่งเป็นดังคำอธิบายก่อนหน้า และโดยรวมค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่ทำการเติมผงเถ้าทั้งสองชนิดมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่เติมผงอะลูมินา(ชิ้นงาน 0 %Ash) ทั้งนี้เนื่องจากผงอะลูมินาที่ใช้นั้นมีอนุภาคขนาดเล็กระดับไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4c) จึงสามารถกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์ได้ค่อนข้างยาก (Mustafa Boz, 2007) เมื่อทำการทดสอบที่มีการเสียดสีกับวัสดุคู่สัมผัสสามารถหลุดออกมาได้ง่าย

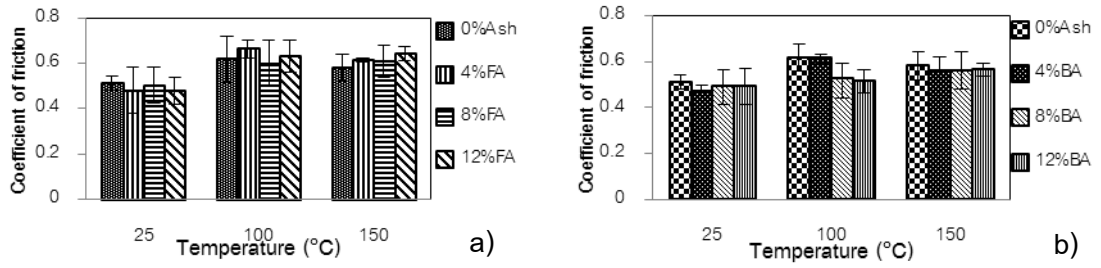


Figure 6 Coefficient of friction of phenolic based composites with ash content at various temperature note: a) fly ash b) bagasse ash

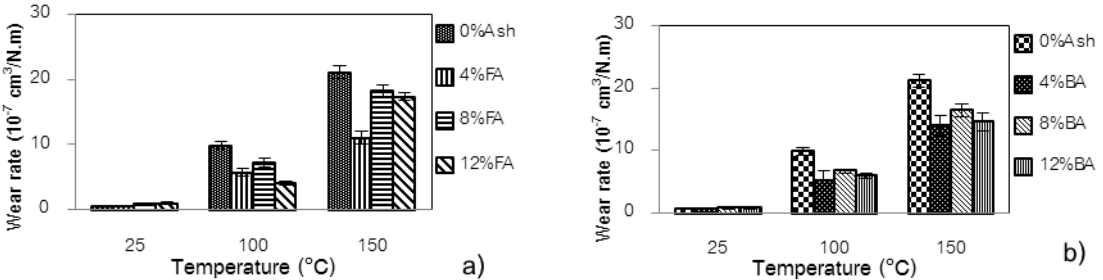


Figure 7 Wear rate of phenolic based composites with ash content at various temperature note: a) fly ash b) bagasse ash

ผลการทดลองตามสภาวะการใช้งานจริงตามมาตรฐาน มอก. 97-2536

จากการพิจารณาค่าความแข็ง ความต้านทานแรงกดอัด และลักษณะการยึดเกาะของเนื้อเมทริกซ์และสารตัวเติมภายในชิ้นงานที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ คาดว่า สูตรที่มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผ้าเบรคได้คือ สูตรที่เติมเถ้าชานอ้อย 4 wt% จึงนำไปทดสอบตามสภาวะการใช้งานจริงของผ้าเบรคตามมาตรฐาน มอก. 97-2536 โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส และเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้า พบว่า ชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้าและชิ้นงานที่เติมเถ้าชานอ้อย 4 wt% นั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกหรอผ่านเกณฑ์ตามที่มาตรฐาน มอก. 97-2536 กำหนดไว้ แสดงดังตารางที่ 2

Table 2 Comparison between without and with natural ash by TIS 97-2536 standard test method

Temperature (°C)	Coefficient of friction			Wear rate (10^{-7} cm^3/N.m)		
	TIS 97-2536	0%Ash	4%BA	TIS 97-2536	0%Ash	4%BA
100	0.300-0.600	0.508	0.494	0.510	0.699	0.531
150	0.250-0.600	0.535	0.538	0.770	0.373	0.323
200	0.200-0.600	0.544	0.552	1.02	0.418	0.307

สรุป

การเติมผงเถ้าจากธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยในชิ้นงานนั้น ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลด้านความแข็งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงเถ้าที่เพิ่มขึ้น และสมบัติด้านความทนแรงกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในส่วนของผลที่เกิดจากการเติมผงเถ้าจากธรรมชาติที่มีต่อสมบัติความเสียดทานและการสึกหรอนั้น พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานมีแนวโน้มคงที่เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และมีแนวโน้มของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูง (100 และ 150 องศาเซลเซียส) ในส่วนของความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงชิ้นงานที่เติมเถ้าลอยและเถ้าชานอ้อยมีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมผงเถ้า และเมื่อทดสอบชิ้นงานตามสภาวะการใช้งานจริงของผ้าเบรค พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกหรอของชิ้นงานผ่านเกณฑ์ตามที่มาตรฐาน มอก. 97-2536 กำหนดไว้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมเถ้าชานอ้อย 4 wt% นั้นเป็นสัดส่วนที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผ้าเบรคที่มีประสิทธิภาพและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุนเมธีวิจัยอาวุโส (รหัสโครงการ RTA 5580009) และโครงการทุนสนับสนุนมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) รวมถึงบริษัท ไนโซ จำกัด บริษัท วิคตอรี่สตาร์ จำกัด และบริษัท ภัทรกานต์ เทรดดิ้ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบสำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ดารณี เจริญสุข, 2555, “การประยุกต์ใช้ฟีนอลิกเรซินในอุตสาหกรรมยาง”, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 27.

D. Chan and G.W. Stachowiak, 2004, “Review of automotive brake friction materials”, **Proceedings of the institution of mechanical engineers**, Vol. 218, pp. 953-967.

D.N.U. Lan, A.A. Bakar, B. Azahari, Z.M. Ariff and Y. Chujo, 2012, “Effect of interlocking between porous epoxy microparticles and elastomer on mechanical properties and deformation modes”, **Polymer Testing**, Vol. 31, pp. 931–937.

J. Remling, 1928, “Basic Principles of Braking”, Brakes, pp. 1-7.

M. Boz and A. Kurt, 2007, “The effect of Al_2O_3 on the friction performance of automotive brake friction materials”, **Tribology International**, Vol. 40, pp. 1161-1169.

N. Mohan, C.R. Mahesha amd R. Raja, 2014, “Tribo-mechanical behaviour of SiC filled glass-epoxy composites at elevated temperatures”, **International Journal of Engineering, Science and Technology**, Vol. 6, No. 5, pp. 44-56.

R. Yun, P. Filip and Y. Lu, 2010, “Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials”, **Tribology International**, Vol. 43, pp. 2010–2019.

S. Kanking, P. Niltui, E. Wimolmala and N. Sombatsompop, 2012, “Use of bagasse fiber ash as secondary filler in silica or carbon black filled natural rubber compound”, **Materials and Design**, Vol. 41, pp. 74–82.

S. Thongsang, W. Vorakhan, E. Wimolmala and N. Sombatsompop, 2012, “Dynamic mechanical analysis and tribological properties of NR vulcanizates with fly ash/precipitated silica hybrid filler”. **Tribology International**, Vol. 53, pp. 134–141.

V.S. Aigbodion, S.B. Hassan, E.T. Dauda and R.A. Mohammed, 2010, “The development of mathematical model for the prediction of ageing behaviour for Al-Cu-Mg/bagasse ash particulate composites”, **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, Vol. 9, No.10, pp. 907-917.

W.Österle, C.Deutsch, T.Gradt, G.Orts-Gi, T.Schneider and A.I. Dmitriev, 2014, “Tribological screening tests for the selection of raw materials for automotive brake pad formulations”, **Tribology International**, Vol. 73, pp. 148-155.

ผลกระทบของอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่มีต่อประสิทธิภาพของเทอร์โบชาร์จเจอร์

Impacts of Lubricant Temperature on Turbocharger Efficiency

สุเมธ ไสยผอม[1] สถาพร เชื้อเพ็ง[1*] และ สืบสกุล คูรุรัตน์[2]

Sumate Saipom[1], Sathaporn Chuepeng[1*] and Suabsakul Gururatana[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของเทอร์โบชาร์จเจอร์ที่ใช้แบริ่งแบบเข็มซึ่งได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น เทอร์โบชาร์จเจอร์ได้ถูกติดตั้งบนแท่นทดสอบโดยใช้ก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์จริงโดยสามารถควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลและอุณหภูมิขาเข้าด้านเทอร์ไบน์ได้ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ทดสอบเป็นแบบเกรดรวม 10W-40 อัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นถูกควบคุมให้คงที่ด้วยปั๊มภายนอกโดยสามารถแปรเปลี่ยนอุณหภูมิได้ ประสิทธิภาพของเทอร์โบชาร์จเจอร์ถูกคำนวณจากอุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหลที่ทางเข้าและทางออกของทั้งด้านเทอร์ไบน์และด้านคอมเพรสเซอร์ ร่วมกับอัตราเร็วการหมุนของเพลาเทอร์โบชาร์จเจอร์ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่สูงกว่าจะให้ประสิทธิภาพมากกว่า สิ่งนี้แสดงให้เห็นถึงความต้องการอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมสำหรับเทอร์โบชาร์จเจอร์ที่ทำงานในสภาวะรุนแรงภายใต้ช่วงกรอบสมรรถนะที่ออกแบบไว้

ABSTRACT

This research worked on the efficiency of a needle bearing type turbocharger as affected by temperature of lubricant. The turbocharger was installed on a test bench using a known component exhaust gases with controllable mass flow and temperature intake to the turbine side. A multi-grade lubricant oil 10W-40 was tested. The lubricant flow rates were kept constant by external supply with inlet temperature variation. The turbocharger efficiencies were determined by the measured inlet and outlet temperatures, pressures and flow rates for both turbine and compressor sides as well as the shaft rotational speeds. The experimental results were revealed that the higher inlet temperatures of the lubricant resulted in higher turbocharger efficiencies. It suggested that a temperature controller for the lubricant oil was required for suitability in such harsh environments for turbocharger to operate within the design performance window.

Key Words: compressor, efficiency, lubricant, temperature, turbine, turbocharger

* Corresponding author; e-mail address: **schuepeng@eng.src.ku.ac.th**

[1]หน่วยวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทดแทน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

Automotive Technology and Alternative Energy Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi 20230

[2]หน่วยวิจัยระบบพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

Energy System Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi 20230

คำนำ

เทอร์โบชาร์จเจอร์ในปัจจุบันได้รับการยอมรับและความสนใจจากบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ที่มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยมีข้อดีคือ การเพิ่มกำลังเครื่องยนต์โดยไม่ต้องขยายปริมาตรความจุกระบอกสูบ และลดการปล่อยก๊าซไอเสียบางชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล นอกจากนี้ เทอร์โบชาร์จเจอร์ได้เริ่มใช้กันอย่างแพร่หลายกับรถยนต์และเครื่องยนต์ประเภทอื่น เช่น เครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงรางร่วม และเครื่องยนต์แก๊สโซลีนระบบฉีดตรงเข้าห้องเผาไหม้ (GDI) เนื่องจากมีแต่อากาศและก๊าซค้างในกระบอกสูบเท่านั้นในจังหวะอัดโดยปราศจากเชื้อเพลิงที่เป็นข้อจำกัดของการน็อคในเครื่องยนต์ (Bontempo *et al*., 2015)

ความร้อนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อเทอร์โบชาร์จเจอร์ เนื่องจากเทอร์ไบน์ต้องถูกไอเสียร้อนไหลผ่านตลอดเวลาที่เครื่องยนต์ทำงาน และถ่ายโอนความร้อนไปยังแกนเพลาของเทอร์โบชาร์จเจอร์ ซึ่งต้องรับภาระทั้งหมุนด้วยความเร็วรอบสูงภายใต้อุณหภูมิสูง แกนเพลาที่รองรับด้วยบูชและแบริ่งจึงจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นและระบายความร้อนด้วยน้ำมันหล่อลื่นที่มีการไหลเวียนมาจากระบบหล่อลื่นหลักของเครื่องยนต์และไหลกลับสู่อ่างน้ำมันหล่อลื่น (Pastor *et al*., 2012)

Chun (2008) เปรียบเทียบน้ำมันหล่อลื่นที่มีและไม่มีฟองอากาศผสมภายใต้สภาวะภาระคงที่ที่ความเร็ว 20,000 rpm พบว่าความเสียดทานจากการใช้น้ำมันที่มีฟองอากาศผสมมีค่าสูงกว่าเนื่องจากการกระจายตัวของความดันที่มากกว่า Pastor *et al*. (2012) ทดลองตัดระบบหล่อลื่นภายในเทอร์โบชาร์จเจอร์เพียงไม่กี่วินาทีพบว่าจะทำให้แกนเพลาของเทอร์โบชาร์จเจอร์เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว Podevin *et al*. (2011) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และความดันของน้ำมันหล่อลื่นภายใต้สภาวะไม่สูญเสียความร้อน พบว่าประสิทธิภาพมีค่าไม่เกิน 30% ที่ความเร็ว 30,000 rpm ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นและความดันที่มีต่อสมรรถนะของคอมเพรสเซอร์ เช่น อัตราส่วนความดัน กำลังประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์ และประสิทธิภาพเชิงกลของเทอร์โบชาร์จเจอร์

Serrano *et al*. (2013) ศึกษาการสูญเสียพลังงานกลของเทอร์โบชาร์จเจอร์ พบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดที่ช่วงความเร็วรอบสูง ส่วนในความเร็วรอบต่ำจะสูญเสียเชิงกลสูง Romagnoli *et al*. (2011) ทดสอบเทอร์โบชาร์จเจอร์ 3 ชนิด พบว่า แบบไม่มีใบปรับมุมทางเข้าเทอร์ไบน์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด 80% ที่ความเร็ว 43 rps ในขณะที่เทอร์โบชาร์จเจอร์แบบมีใบปรับมุมทางเข้าช่องเดียวและสองช่องมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันคือ 77% และ 79% ตามลำดับ ที่ความเร็ว 28 rps เมื่อปรับมุมใบพัด 60 องศา

Deligant *et al*. (2012) อธิบายการไหลของก๊าซไอเสียที่มีความเร็วและความร้อนสูง สามารถทำให้ใบพัดของเทอร์ไบน์และคอมเพรสเซอร์หมุนด้วยความเร็วรอบสูงในบางรุ่นและบางสภาวะหมุนเกินกว่าแสนรอบต่อนาที เพราะมีทั้งการขยายตัวของความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ และความเร็วของไอเสีย เมื่อเทอร์โบชาร์จเจอร์ทำงานที่ความเร็วรอบสูงจะทำให้เกิดความเสียดทานที่แบริ่งของแกนเพลา และในขณะเดียวกันจะส่งผลทำให้อัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นไปด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ยังมีประเด็นที่ต้องทำการศึกษาในส่วนของอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพของเทอร์โบชาร์จเจอร์ โดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำทำงานที่สภาวะภาระเบา อันเป็นช่วงที่เทอร์โบชาร์จเจอร์เกิดความเฉื่อย (turbo-lack) ซึ่งเป็นที่มาของวัตถุประสงค์ในงานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

แท่นทดสอบเทอร์โบชาร์จเจอร์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นไปตามแผนผังดังแสดงใน Figure 1 ประกอบด้วย (1) หน่วยสร้างก๊าซขับดันเทอร์ไบน์ (2) หน่วยควบคุมน้ำมันหล่อลื่น (3) หน่วยเทอร์โบชาร์จเจอร์ และ (4) หน่วยอุปกรณ์การวัดส่วนควบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

หน่วยสร้างก๊าซขับดันเทอร์ไบน์ ใช้เครื่องยนต์ดีเซล Nissan รุ่น TD27 ปริมาตรความจุกระบอกสูบ 2,700 cc ทำงานที่ความเร็วรอบ 2,000 rpm สร้างก๊าซไอเสียที่มีองค์ประกอบหลักโดยโมล ได้แก่ ออกซิเจน 18.5% คาร์บอนไดออกไซด์ 1.5% ไอน้ำ 1.7% และ ไนโตรเจน 78.3% วัดจากเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียของ Testo รุ่น 350XL เพื่อใช้ในการคำนวณสภาวะก๊าซขาเข้าเทอร์ไบน์

หน่วยควบคุมน้ำมันหล่อลื่น ใช้ปั๊มน้ำมันไฮโดรลิคที่ถูกขับด้วยมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า โดยสามารถปรับอัตราการไหลและควบคุมอุณหภูมิได้ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้เป็นแบบกึ่งสังเคราะห์ตามมาตรฐาน API SN ชั้นความหนืด 10W-40 โดยมีค่าความหนืดที่ 100°C เป็น 14.9 cSt และดัชนีความหนืด (viscosity index) มีค่าเป็น 152

หน่วยเทอร์โบชาร์จเจอร์ ใช้เทอร์โบชาร์จเจอร์ Garrettt รุ่น M24 มีอัตราส่วนพื้นที่ต่อรัศมี (A/R ratio) ด้านคอมเพรสเซอร์เป็น 0.80 และอัตราส่วนพื้นที่ต่อรัศมีด้านเทอร์ไบน์เป็น 0.64 ทางเข้าและทางออกของคอมเพรสเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52 และ 44 mm ตามลำดับ ในขณะที่ทางเข้าและทางออกของเทอร์ไบน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 และ 60 mm ตามลำดับ

หน่วยอุปกรณ์การวัดส่วนควบ ใช้ตัววัดอุณหภูมิเป็นเทอร์โมคัปเปิล (K type) เพื่อวัดอุณหภูมิขาเข้าและขาออกด้านคอมเพรสเซอร์และด้านเทอร์ไบน์ ในส่วนของความดันได้มีการวัดในรูปของความสูงของน้ำโดยใช้มานอมิเตอร์ การวัดอัตราการไหลของสารทำงานทั้งทางด้านเทอร์ไบน์และคอมเพรสเซอร์ (ที่สภาวะ 04 และ 02 ตามลำดับ) ใช้ anemometer ของ Benetech รุ่น GM8901 การวัดความเร็วรอบของแกนเพลาเทอร์โบชาร์จเจอร์ใช้ RPM meter ของ Digicon รุ่น DT-246L แบบไม่สัมผัสโดยสามารถวัดความเร็วรอบได้ถึง 99,999 rpm

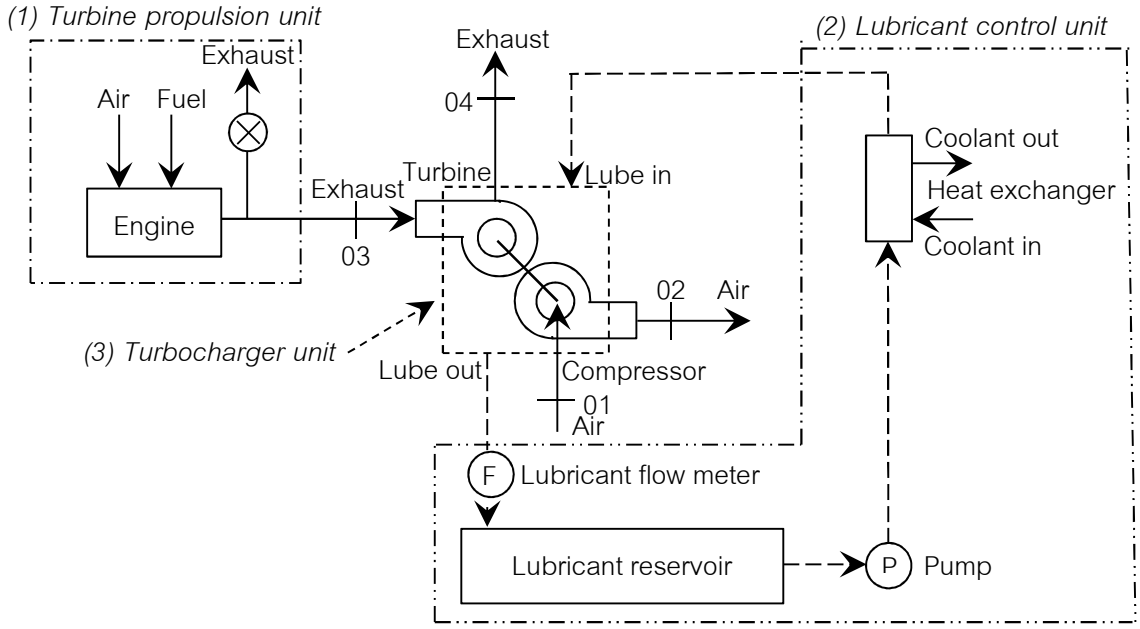


Figure 1 Schematic diagram of the turbocharger test bench and apparatus

(Stages: 01 = compressor inlet, 02 = compressor outlet, 03 = turbine inlet and 04 = turbine outlet)

การคำนวณตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (Heywood, 1988) เมื่อคิดให้การไหลเป็นแบบคงตัวผ่านปริมาตรควบคุมรอบเทอร์โบชาร์จเจอร์ สำหรับคอมเพรสเซอร์ ประสิทธิภาพคอมเพรสเซอร์ (compressor total-to-total isentropic efficiency, η_{CTT}) หาจากสมการ (1)

$$\eta_{CTT}=\frac{h_{02s}-h_{01}}{h_{02}-h_{01}}=\frac{T_{02s}-T_{01}}{T_{02}-T_{01}}=\frac{(p_{02}/p_{01})^{(\gamma-1)/\gamma}}{(T_{02}/T_{01})-1} \quad (1)$$

เมื่อ h คือ เอนทัลปี T คือ อุณหภูมิ p คือ ความดัน และ γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ ตัวห้อย 0 แสดงถึงสภาวะนิ่ง (stagnation) ตัวห้อย s หมายถึงที่สภาวะ isentropic process ก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์ใช้สัญลักษณ์ตัวห้อย 1 ในขณะที่ตัวห้อย 2 เป็นสัญลักษณ์ของสภาวะที่ออกจากคอมเพรสเซอร์

กำลังที่ใช้ในการขับคอมเพรสเซอร์ ($\dot{W}_C$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

$$-\dot{W}_C=\dot{m}_i C_{p,i}(T_{02}-T_{01})=\frac{\dot{m}_i C_{p,i} T_{01}}{\eta_{CTT}}\left[\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}-1\right] \quad (2)$$

เมื่อ $\dot{m}_i$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซผ่านคอมเพรสเซอร์ และ $C_{p,i}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซผ่านคอมเพรสเซอร์

ประสิทธิภาพเทอร์ไบน์ (turbine total-to-total isentropic efficiency, η_{TTT}) หาจากสมการ (3)

$$\eta_{TTT}=\frac{h_{03}-h_{04}}{h_{03}-h_{04s}}=\frac{T_{03}-T_{04}}{T_{03}-T_{04s}}=\frac{1-(T_{04}/T_{03})}{1-(p_{04}/p_{03})^{(\gamma-1)/\gamma}} \quad (3)$$

เมื่อตัวห้อย 3 เป็นสัญลักษณ์ของสภาวะที่เข้าเทอร์ไบน์ และตัวห้อย 4 เป็นสัญลักษณ์ของสภาวะออกจากเทอร์ไบน์

กำลังที่ได้จากเทอร์ไบน์ ($\dot{W}_T$) สามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$\dot{W}_T=\dot{m}_e C_{p,e}(T_{03}-T_{04})=\dot{m}_e C_{p,e}\eta_{TTT}T_{03}\left[1-\left(\frac{p_{04}}{p_{03}}\right)^{(\gamma_e-1)/\gamma_e}\right] \quad (4)$$

เมื่อ $\dot{m}_e$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซผ่านเทอร์ไบน์ และ $C_{p,e}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซผ่านเทอร์ไบน์

ประสิทธิภาพเชิงกลของเทอร์โบชาร์จเจอร์ (mechanical efficiency, η_m) สามารถคำนวณได้จากสมการ (5)

$$-\dot{W}_C=\eta_m\dot{W}_T \quad (5)$$

สภาวะการทดลอง

ดำเนินการทดลองโดยกำหนดตัวแปรต้นเป็นอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซไอเสียขาเข้าเทอร์ไบน์ให้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.28 kg/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซไอเสียที่ปลดปล่อยจากเครื่องยนต์ที่ 2,000 rpm นอกจากนี้ ยังมีการกำหนดตัวแปรต้นเป็นอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นคือ 50°C, 70°C และ 90°C ภายใต้ตัวแปรควบคุมคือ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียเข้าเทอร์ไบน์อยู่ที่ 105 ± 2°C เพื่อจำลองสภาวะการทำงานที่ภาระเครื่องยนต์น้อย ในการนี้ มีตัวแปรตามได้แก่ อุณหภูมิและความดันขาเข้าและขาออกด้านคอมเพรสเซอร์และด้านเทอร์ไบน์

อัตราการไหลของสารทำงานทั้งทางด้านเทอร์ไบน์และคอมเพรสเซอร์ และความเร็วรอบของแกนเพลาเทอร์โบชาร์จเจอร์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สมรรถนะของคอมเพรสเซอร์

สมรรถนะของคอมเพรสเซอร์แสดงได้ในรูปของอัตราส่วนความดัน (p_{02}/p_{01}) และงานที่ต้องใช้ในการอัดที่แปรผันตามอัตราการไหลเชิงมวลผ่านคอมเพรสเซอร์ แสดงใน Figure 2 และ 3 ตามลำดับ ตลอดช่วงการไหลเชิงมวลของก๊าซผ่านคอมเพรสเซอร์จะมีลักษณะลดลงและเพิ่มขึ้นคล้ายตกท้องช้าง (Heywood, 1988) ในขณะที่น้ำมันหล่อลื่นอุณหภูมิ 90°C จะให้อัตราส่วนความดันสูงที่สุดที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากัน (Figure 2) ทั้งนี้เป็นผลมาจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นลดลง จึงทำให้สามารถสร้างความดันขาออกคอมเพรสเซอร์ได้มากขึ้น เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซผ่านคอมเพรสเซอร์เพิ่มมากขึ้น (Figure 3) ต้องการงานที่ใช้ในการขับคอมเพรสเซอร์เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 90°C ซึ่งต้องการงานที่ใช้ในการขับมากที่สุดที่อัตราการไหลเดียวกัน

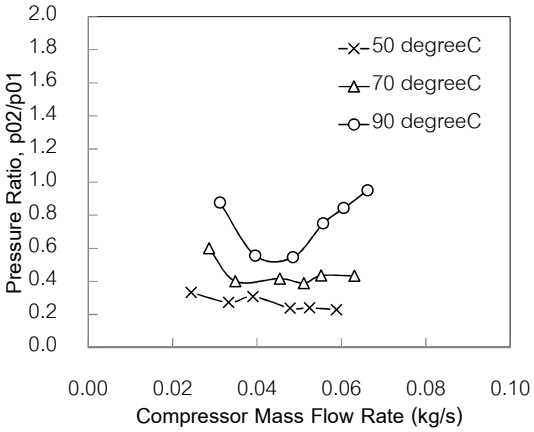


Figure 2 Compressor pressure ratio

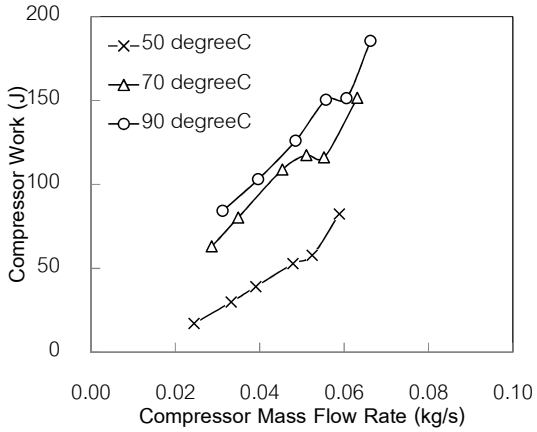


Figure 3 Compressor work

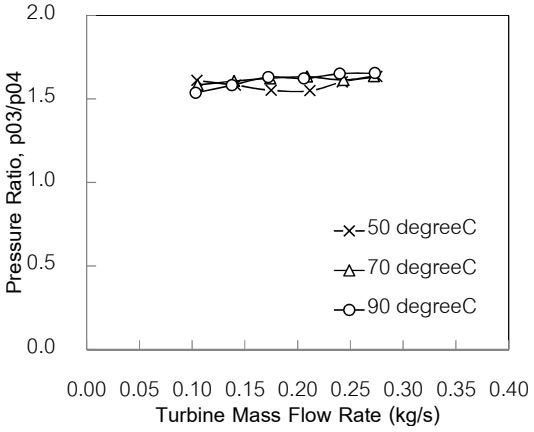


Figure 4 Turbine pressure ratio

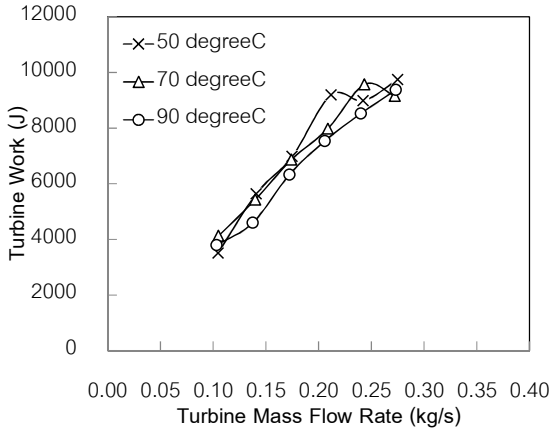


Figure 5 Turbine work

สมรรถนะของเทอร์ไบน์

สมรรถนะของเทอร์ไบน์แสดงได้ในรูปของอัตราส่วนความดัน (p_{03}/p_{04}) และงานที่สร้างได้จากเทอร์ไบน์ ซึ่งแปรผันตามอัตราการไหลเชิงมวลผ่านเทอร์ไบน์ แสดงใน Figure 4 และ 5 ตามลำดับ ตลอดช่วงอัตราการไหล

ใน Figure 4 พบว่าอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นไม่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนของอัตราส่วนความดันที่แปรผันอยู่ในช่วงแคบและค่อนข้างคงที่ประมาณ 1.6 เท่า เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซผ่านเทอร์ไบน์เพิ่มมากขึ้น (Figure 5) เทอร์ไบน์สามารถผลิตงานได้เพิ่มมากขึ้น โดยไม่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของผลกระทบจากอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นที่มีต่องานที่เทอร์ไบน์ผลิตได้

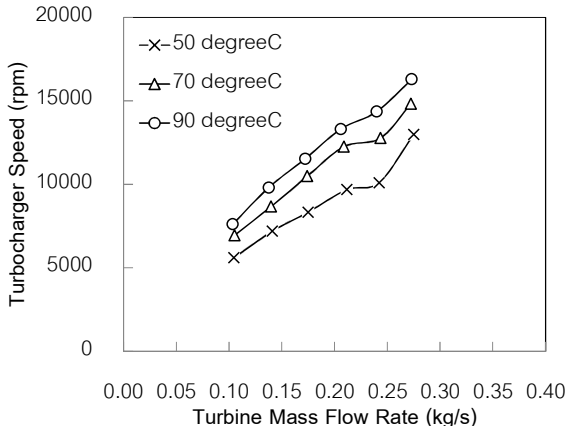


Figure 6 Turbocharger speed

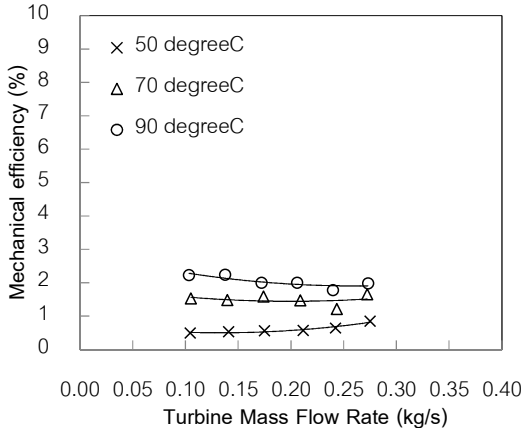


Figure 7 Mechanical efficiency

ประสิทธิภาพของเทอร์โบชาร์จเจอร์

เมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียผ่านเทอร์ไบน์มากขึ้นทำให้ความเร็วรอบของแกนเพลาเทอร์โบชาร์จเจอร์เพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงใน Figure 6 ทั้งนี้ อัตราการไหลของก๊าซไอเสียผ่านเทอร์ไบน์สูงสุดประมาณ 0.28 kg/s ทำให้เทอร์โบชาร์จเจอร์หมุนเร็วที่สุดประมาณ 17,000 rpm ซึ่งได้จากการใช้น้ำมันหล่อลื่นอุณหภูมิ 90°C และเป็นความเร็วรอบที่ใกล้เคียงกับผลจาก Chun (2008) Figure 7 แสดงประสิทธิภาพเชิงกลของเทอร์โบชาร์จเจอร์ที่แปรผันตามอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซไอเสียผ่านเทอร์ไบน์ พบว่า น้ำมันหล่อลื่นอุณหภูมิ 90°C ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกลสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่เท่ากัน อย่างไรตาม ประสิทธิภาพเชิงกลที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ (<3%) เนื่องจากสภาวะการทำงานเป็นแบบภาระต่ำมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก Serrano *et al*. (2013)

สรุป

ผลกระทบจากอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กับเทอร์โบชาร์จเจอร์ภายใต้ภาระเบาแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของคอมเพรสเซอร์และเทอร์ไบน์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น อัตราส่วนความดันของคอมเพรสเซอร์และงานที่ต้องใช้ในการอัดแปรผันตามอัตราการไหลเชิงมวลผ่านคอมเพรสเซอร์ โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีอุณหภูมิสูงจะให้อัตราส่วนความดันสูง เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซผ่านคอมเพรสเซอร์เพิ่มมากขึ้นต้องการงานที่ใช้ในการขับคอมเพรสเซอร์เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นที่มีอุณหภูมิสูง ในขณะที่ผลกระทบจากอุณหภูมิน้ำมันหล่อลื่นไม่ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนต่ออัตราส่วนความดันและงานที่สร้างได้จากเทอร์ไบน์ เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพเชิงกลของเทอร์โบชาร์จเจอร์ พบว่า อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่สูงกว่าจะให้ประสิทธิภาพมากกว่า แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสมในการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย และทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Bontempo, R., M. Cardone, M. Manna and G. Vorraro. 2015. Steady and unsteady experimental analysis of a turbocharger for automotive applications. **Energy Conversion and Management** 99: 72-80.

Chun, S.M. 2008. Aeration effects on the performance of a turbocharger journal bearing. **Tribology International** 41: 296-306.

Deligant, M., P. Podevin and G. Descombes. 2012. Experimental identification of turbocharger mechanical friction losses. **Energy** 39: 388-394.

Heywood, J.B. 1988. **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill, Singapore.

Pastor, J.V., J.R. Serrano, V. Dolz, M.A. López and F. Bouffaud. 2012. Study of turbocharger shaft motion by means of non- invasive optical Techniques: Application to the behavior analysis in turbocharger Lubrication failures. **Mechanical Systems and Signal Processing** 32: 292-305.

Podevin, P., A. Clenci and G. Descombes. 2011. Influence of the lubricating oil pressure and temperature on the performance at low speeds of a centrifugal compressor for an automotive engine. **Applied Thermal Engineering** 31: 194-201.

Romagnoli, A., R.F. Martinez-Botas and S. Rajoo. 2011. Steady state performance evaluation of variable geometry twin-entry turbine. **International Journal of Heat and Fluid Flow** 32: 477-489.

Serrano, J.R., P. Olmeda, A. Tiseira, L.M. García-Cuevas and A. Lefebvre. 2013. Theoretical and experimental study of mechanical losses in automotive turbochargers. **Energy** 55: 888-898.

เสถียรภาพของการเผาไหม้เอทานอลแบบเปียกที่รอบเดินเบาภายใต้สภาวะส่วนผสมบางในเครื่องยนต์แก๊สโซลีน

Stability of a Hydrous Ethanol Combustion at Idling under Lean Condition in Gasoline Engine

สุเดชา ศรีสุวรรณ[1] สถาพร เชื้อเพ็ง[1*] และ สืบสกุล คุรุรัตน์[2]

Sudecha Srisuwan[1], Sathaporn Chuepeng[1*] and Suabsakul Gururatana[2]

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้เอทานอลแบบเปียกเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงแก๊สโซลีนได้แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกับที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สโซลีนในแง่ของประสิทธิภาพเชิงความร้อนและกำลังส่งออกจากเครื่องยนต์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อลดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์โตโยต้า 4 สูบ ระบบฉีดเชื้อเพลิงเข้าช่องไอดีในสภาวะเดินเบา เครื่องยนต์ทำงานด้วยเอทานอลแบบเปียกภายใต้สภาวะส่วนผสมบางโดยมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของการเผาไหม้ด้วยระบบวัดความดันในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนสำหรับค่าความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้และปริมาณก๊าซมลพิษถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของการเผาไหม้ ผลจากการทดลองพบว่า เครื่องยนต์บริโภคเอทานอลแบบเปียกน้อยกว่า 12% (โดยมวล) เทียบกับเอทานอลแบบแห้งที่ขีดจำกัดของส่วนผสมบาง ณ อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศเป็น 0.67

ABSTRACT

The application of hydrous ethanol to replace gasoline fuel has shown to gain similar outcomes as of gasoline combustion in terms of engine thermal efficiency and power output. The aim of research is to minimize fuel quantity injected to the combustion chamber of a 4-cylinder port fuel injection Toyota engine under idle condition. The engine running with hydrous ethanol undergoes within lean-burn condition as its combustion stability is analyzed using an engine indicating system. Coefficient of variation in indicated mean effective pressure and emission gases are indicators for combustion stability. The experimental results have found that the engine consumes lesser hydrous ethanol by 12% (by mass) compared with those of anhydrous ethanol at the lean limit of fuel-to-air equivalence ratio of 0.67.

Key Words: anhydrous, combustion, cyclic variation, ethanol, emissions, hydrous, stability

[*]Corresponding author; e-mail address: **schuepeng@eng.src.ku.ac.th**

[1]หน่วยวิจัยเทคโนโลยียานยนต์และพลังงานทดแทน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

Automotive Technology and Alternative Energy Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi 20230

[2]หน่วยวิจัยระบบพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

Energy System Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi 20230

คำนำ

ในปัจจุบัน ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคขนส่งที่มีความสำคัญต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ดังนั้น การเสาะแสวงหาเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่เพื่อมาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก (Bielaczyc *et al*., 2015) ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการส่งเสริมการใช้เชื้อเพลิงทางเลือก ได้แก่ ไบโอดีเซล และเอทานอล

เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยแบ่งเป็นเอทานอลแบบแห้ง (anhydrous ethanol) คือเอทานอลที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์จนมีองค์ประกอบที่เป็นน้ำอยู่ไม่เกิน ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร (เรียก E100) และเอทานอลแบบเปียก (hydrous ethanol) คือเอทานอลที่ได้จากกระบวนการหมักและกลั่น โดยยังไม่ผ่านกระบวนการแยกน้ำ มีองค์ประกอบที่เป็นน้ำอยู่ ร้อยละ 5 โดยปริมาตร (เรียก hE100) Kumar *et al*. (2010) นำเสนอเอทานอลที่ผลิตได้จากพืชหลากหลายชนิด เช่น ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ฯลฯ โดยการนำเอทานอล E100 ไปผสมกับเชื้อเพลิงแก๊สโซลีนในสัดส่วนที่แตกต่างกันเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทางเลือก เช่น แก๊สโซฮอล์ (E10) อี20 (E20) และ อี85 (E85) จึงเป็นการส่งเสริมเกษตรกรและยังช่วยลดการปลดปล่อยมลพิษบางชนิดได้อีกด้วย (Kim *et al*., 2015) อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาถึงต้นทุนการผลิตจะพบว่า กระบวนการแยกน้ำออก (Dehydration) ที่ทำให้เอทานอลแบบเปียก (hE100) เป็นเอทานอลแบบแห้ง (E100) มีต้นทุนสูงและใช้พลังงานมาก ในขณะที่ คุณสมบัติของเอทานอลแบบแห้งกับเอทานอลแบบเปียกมีความใกล้เคียงกัน (Saffy *et al*., 2015)

Costa and Sodre (2010) ศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างเอทานอลแบบเปียก (มีน้ำผสม 6.8%) กับแก๊สโซลีน 78% ผสมกับเอทานอล 22% ในเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 4 สูบ 4 จังหวะ พบว่าแรงบิดและประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการเผาไหม้เอทานอลแบบเปียกจะมีค่าสูงกว่าแก๊สโซลีนผสมเอทานอล และการปลดปล่อยมลพิษของเอทานอลแบบเปียก เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนน้อยกว่าจากการเผาไหม้แก๊สโซลีนผสมเอทานอล แต่ตรงข้ามกับผลที่ได้จาก Gupta *et al*. (2011) ที่ศึกษาผลกระทบของเอทานอลแบบเปียก (มีน้ำผสม 10% และ 20%)

จากสภาพการจราจรที่ติดขัด เกิดการเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์และปลดปล่อยมลพิษ เป็นเหตุให้ทำการศึกษาเสถียรภาพของเครื่องยนต์ที่รอบเดินเบาภายใต้การจ่ายเชื้อเพลิงให้น้อยที่สุด โดยการทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิง-อากาศเป็นส่วนผสมบาง (lean mixture) Wang *et al*. (2010) ทดลองใช้เครื่องยนต์แก๊สโซลีน 4 สูบ 1.6 ลิตร โดยใช้เชื้อเพลิงหลักเป็นเอทานอลและฉีดไฮโดรเจนเสริมเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของเครื่องยนต์หลังจากมีการเพิ่มไฮโดรเจนภายใต้รอบเดินเบาและการเผาไหม้ตามทฤษฎี Ceviz *et al*. (2012) เติมไฮโดรเจนกับแก๊สโซลีนให้ได้ส่วนผสมบาง ส่งผลต่อประสิทธิภาพและการปลดปล่อยไอเสียที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์แก๊สโซลีน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเอทานอลแบบแห้งและเอทานอลแบบเปียกมีศักยภาพในการทดแทนน้ำมันแก๊สโซลีน และยังพบว่าสารผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศแบบส่วนผสมบางสามารถลดการปลดปล่อยมลพิษและทำให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิง แต่ยังคงต้องคำนึงถึงเรื่องความมีเสถียรภาพของเครื่องยนต์ในรอบเดินเบา จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของการเผาไหม้ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้เอทานอลแบบเปียกภายใต้สภาวะส่วนผสมบางในรอบเดินเบา

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องยนต์และเครื่องทดสอบสมรรถนะ

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการศึกษาเชิงทดลองเป็นเครื่องยนต์แก๊สโซลีนยี่ห้อโตโยต้า รุ่น 4A-FE 4 สูบ 4 จังหวะ ระบายความร้อนด้วยน้ำ ระบบฉีดเชื้อเพลิงควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อมูลจำเพาะดังแสดงใน Table 1 เครื่องยนต์ได้ถูกติดตั้งกับเครื่องทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์แบบใช้น้ำเป็นภาระ ยี่ห้อ Schenck รุ่น D-400-1e

Table 1 Engine specification

Bore × stroke	81 mm × 77 mm
Displacement	1,587 cc
Maximum torque	147 Nm at 5,200 rpm
Maximum power	85 kW at 6,000 rpm
Compression ratio	9.5:1

เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศและเชื้อเพลิง

อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เครื่องยนต์ถูกวัดด้วยเครื่อง Testo รุ่น 435 มีความถูกต้องอยู่ในช่วง ±0.3% ส่วนอัตราการไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิงใช้เครื่องวัด CST รุ่น CDR-6 มีความถูกต้องอยู่ในช่วง ±0.05 g

เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

องค์ประกอบก๊าซไอเสีย ไฮโดรคาร์บอน (HC) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ถูกวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียของ Testo รุ่น 350-XL โดย HC มีช่วงการวัดอยู่ที่ 0-5,000 ppm โดยปริมาตร ภายใต้ความถูกต้อง ±5 ppm และการวัด CO อยู่ในช่วง 0-10% โดยปริมาตร มีค่าความถูกต้อง ±5% ระบบการวัดก๊าซไอเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์อยู่บนพื้นฐานการวัดแบบแห้ง

ชุดอุปกรณ์วัดความดันในกระบอกสูบ

ข้อมูลความดันในกระบอกสูบที่สมนัยกับตำแหน่งของเพลาข้อเหวี่ยงถูกใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของการเผาไหม้ ความดันจากการเผาไหม้ในกระบอกสูบ (สูบ 4) ถูกวัดด้วยตัวรับรู้ความดันของ Kistler รุ่น 6052C มีความไวต่อสัญญาณ -19.90 pC/bar ที่ 200°C และมีความเป็นเชิงเส้น ±0.4% FSO สัญญาณที่ได้ถูกส่งไปยังตัวขยายสัญญาณของ Dewetron รุ่น DEWE-30-4 เพื่อใช้ในการขยายและปรับแต่งสัญญาณจากตัวรับรู้ความดัน ในขณะเดียวกัน ตัววัดตำแหน่งของเพลาจาก Digicon ถูกใช้ในการกำหนดตำแหน่งเพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ที่หมุนอยู่ ในการใช้งานมีการกำหนดอัตราการวัดตำแหน่งของเพลาเป็น 360 ppr สัญญาณทั้งหมดถูกส่งเข้าระบบรับข้อมูลของ Dewetron รุ่น DEWE-ORION-0816-100x มีอัตราการสุ่มข้อมูล 1 MS/s และใช้ซอฟแวร์ DEWEsoft V.6.6.8 ในการวิเคราะห์ข้อมูล ความดันในกระบอกสูบจำนวน 120 วัฏจักรต่อเนื่องกันถูกนำมาเฉลี่ยพร้อมทั้งหาค่าทางสถิติเพื่อเป็นตัวแทนของค่าคุณลักษณะของการเผาไหม้ในแต่ละสภาวะการทดลอง

Table 2 Key fuel properties (Nilaphai and Chuepeng, 2014)

Selected properties	Gasoline	E100	hE100
Chemical formula	C_8H_{18}	C_2H_6O	$C_{1.71}H_{5.52}O$
Theoretical air-to-fuel ratio	14.6	8.9	8.4
Density (kg/l)	0.733 @ 15°C	0.781 @ 30°C	0.798 @ 30°C
Lower heating value (MJ/kg)	43.15	27.77	26.52
Viscosity (cSt)	N/A	1.09	1.20
Octane number	95	120	112

เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแก๊สโซลีน (gasoline) เอทานอลแบบแห้ง (anhydrous ethanol, E100) และเอทานอลแบบเปียก (hydrous ethanol, hE100) ซึ่งคุณสมบัติโดยหลักของเชื้อเพลิงแสดงใน Table 2

การคำนวณตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (indicated mean effective pressure, imep) เป็นกำลังของเครื่องยนต์ในหน่วยของความดันที่คำนวณจากกำลัง (P_i) ปริมาตรกระจัด (V_d) และรอบเครื่องยนต์ (N) ตามสมการ (1)

$$\text{imep}=\frac{2P_i}{V_dN} \tag{1}$$

สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (coefficient of variation in indicated mean effective pressure, COV_{imep}) คำนวณจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ imep (σ_{imep}) และค่าเฉลี่ยของ imep ($\bar{x}_{imep}$) ตามสมการ (2) (Heywood, 1988)

$$COV_{imep}=\frac{\sigma_{imep}}{\bar{x}_{imep}}x100 \tag{2}$$

ความดันในกระบอกสูบที่สมนัยกับมุมเพลาข้อเหวี่ยงสามารถนำไปคำนวณหาเศษส่วนมวลที่เผาไหม้ (mass fraction burnt, x_b) ตามสมการ (3) เมื่อ Δp_c คือ ความดันกระบอกสูบที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเผาไหม้

$$x_b=\frac{\sum_o^i \Delta p_c}{\sum_o^N \Delta p_c} \tag{3}$$

สภาวะการทดลอง

การทดสอบเครื่องยนต์กระทำภายใต้รอบเดินเบา (~900 rpm) โดยใช้เชื้อเพลิงเอทานอลแบบแห้ง และเอทานอลแบบเปียก ต่อไปนี้เรียก E100 และ hE100 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับแก๊สโซลีน โดยปรับปริมาณการฉีดเชื้อเพลิงให้เกิดส่วนผสมพอดีและปรับปริมาณเชื้อเพลิงให้ลดลงจนกว่าเครื่องยนต์จะเดินไม่เสถียร

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

คุณลักษณะของการเผาไหม้

Figure 1 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบของความดันในกระบอกสูบช่วงปลายจังหวะอัดและต้นจังหวะขยายของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิง Gasoline, E100 และ hE100 โดยยังไม่มีการปรับปริมาณเชื้อเพลิง ความดันสูงสุด

จากการเผาไหม้เรียงตามลำดับเป็น hE100>E100>Gasoline ตามลำดับ ข้อมูลความดันกระบอกสูบถูกนำไปคำนวณหาเศษส่วนมวลที่เผาไหม้ตามสมการ (3) และแสดงใน Figure 2 เมื่อเครื่องยนต์เดินเบาและไม่ได้ปรับปริมาณเชื้อเพลิง อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศของการเผาไหม้ Gasoline/E100/hE100 เป็น 1.00/0.99/0.76 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิง Gasoline กับ E100 ที่มีอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศพอๆกัน พบว่า E100 สามารถเผาไหม้ได้เร็วกว่า โดยสังเกตได้จากความชันของกราฟ เนื่องจากมีความเร็วเปลวไฟแบบราบเรียบที่สูงกว่าแก๊สโซลีน (Costa and Sodre, 2010) หากเป็นเชื้อเพลิงเดียวกันเครื่องยนต์ทำงานที่อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศมากกว่าจะสามารถเผาไหม้ได้เร็วกว่า เช่น การเผาไหม้ E100 และ hE100 ใน Figure 3 และ 4 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อัตราเร็วการเผาไหม้จะไม่แตกต่างกันมากในกรณี hE100 ที่สังเกตเห็นได้ใน Figure 4

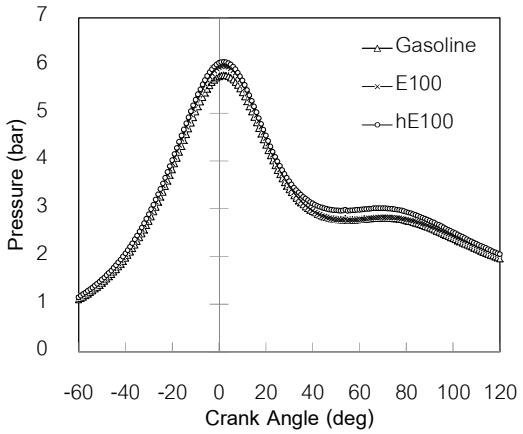


Figure 1 Cylinder pressure

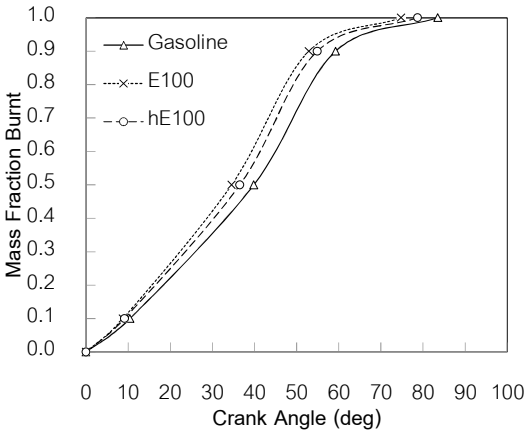


Figure 2 Comparison of mass fraction burnt

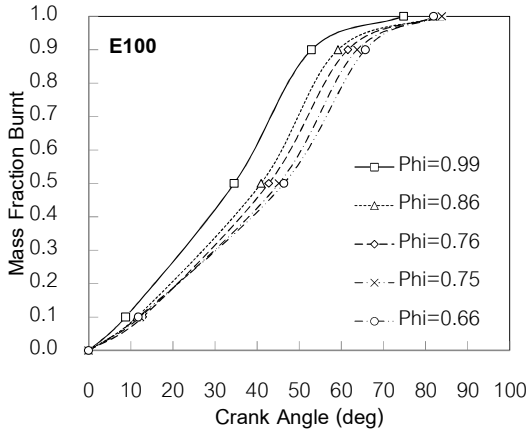


Figure 3 Mass fraction burnt of E100

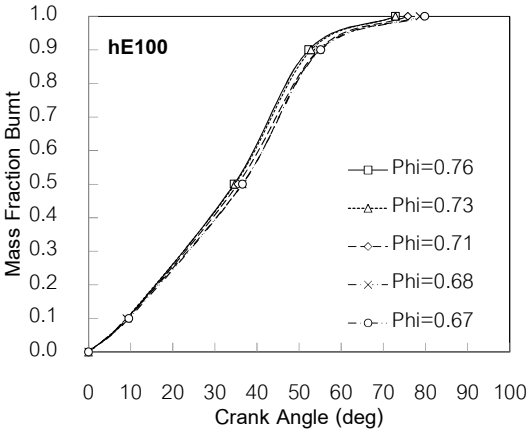


Figure 4 Mass fraction burnt of hE100

Figure 5 แสดงสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (COV_{imep}) โดยที่การใช้เชื้อเพลิง E100 และ hE100 มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีการปรับลดปริมาณเชื้อเพลิงให้เกิดส่วนผสมบาง แต่ค่าของ COV_{imep} ยังอยู่ในช่วง ±20% เมื่อเปรียบเทียบกับ Gasoline นอกจากนี้ hE100 มี COV_{imep} น้อยกว่า Gasoline อยู่ 1-2% แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เอทานอลแบบเปียกทดแทนแก๊สโซลีนได้แม้ในสภาวะรอบเดินเบาและมีอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศน้อยกว่า 1 อย่างไรก็ตาม Heywood (1988) แนะนำว่าปัญหาในการขับขี่

ยานพาหนะจะเกิดขึ้นเมื่อ COV_{imep} มีค่าเกินกว่า 10% Figure 6 แสดงอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงที่รอบเดินเบา อัตราการบริโภคเชื้อเพลิง hE100 มากกว่า Gasoline อยู่ระหว่าง 0.94-1.07 kg/h คิดเป็น 170-193% แต่เมื่อนำ hE100 ไปเปรียบเทียบกับ E100 พบว่าอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงของ hE100 น้อยกว่าอยู่ระหว่าง 0.1-0.35 kg/h คิดเป็น 8-22% ณ ขีดจำกัดของส่วนผสมบางที่อัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิงต่ออากาศเป็น 0.67 เครื่องยนต์บริโภค hE100 น้อยกว่า E100 อยู่ประมาณ 12% โดยมวล

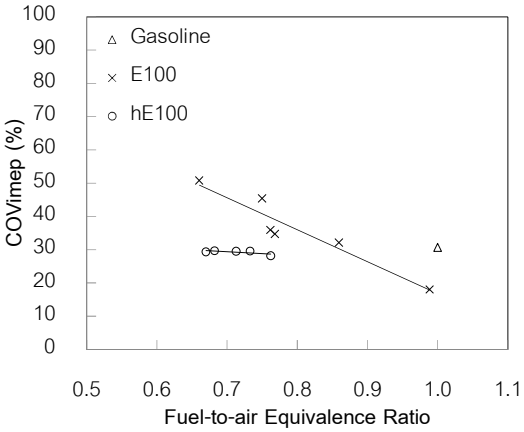


Figure 5 Coefficient of variation of imep

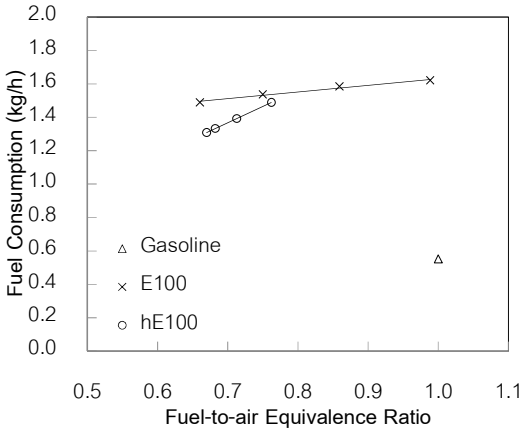


Figure 6 Fuel consumption

การปลดปล่อยก๊าซไอเสีย

Figure 7 แสดงปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสาม เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย Gasoline>E100>hE100 เมื่อมีการลดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง hE100 เทียบกับ Gasoline จะพบว่ามีปริมาณ HC น้อยกว่าประมาณ 203-221 ppm และเมื่อเทียบกับ E100 จะพบว่าปริมาณ HC น้อยกว่าประมาณ 20-171 ppm และสำหรับ hE100 กับ E100 มีอัตราการลดลงของการปลดปล่อย HC ถึงจุดต่ำสุดที่ 66 ppm และ 86 ppm ตามลำดับ และจะเพิ่มขึ้นตามทฤษฎีการเผาไหม้เมื่อส่วนผสมบางลงอีก (Heywood, 1988) Figure 8 แสดงปริมาณ CO ที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสาม เมื่อมีการลดปริมาณการฉีดเชื้อเพลิง hE100 เทียบกับ Gasoline พบว่ามีปริมาณ CO น้อยกว่า 2.0-2.5% และเมื่อเทียบกับ E100 จะพบว่าปริมาณ CO มากกว่าอยู่ระหว่าง 0.2-1.1% และสำหรับ hE100 กับ E100 มีอัตราการลดลงของการปลดปล่อย CO ถึงจุดต่ำสุดที่ 0.2% และ 0% ตามลำดับ และจะเพิ่มขึ้นตามทฤษฎีการเผาไหม้เมื่อส่วนผสมบางลงอีก

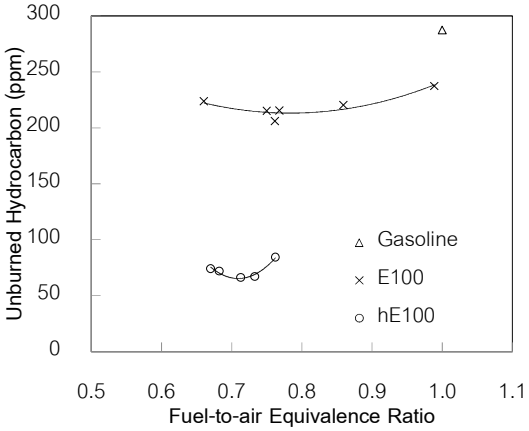


Figure 7 Unburned hydrocarbon

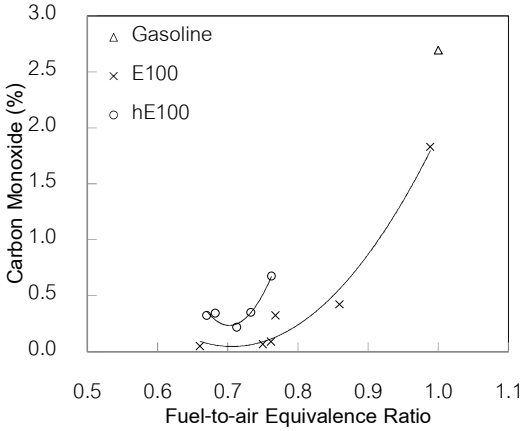


Figure 8 Carbon monoxide

สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาขอบเขตของการใช้เอทานอลแบบเปียก (hE100) เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนภายใต้ส่วนผสมบางที่สภาวะเดินเบา จากการวิเคราะห์อัตราการบริโภคเชื้อเพลิง คุณลักษณะของการเผาไหม้และการปลดปล่อยก๊าซไอเสีย พบว่า hE100 มีความสามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงอื่นได้ถึงแม้จะมีอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงมากกว่าแก๊สโซลีนแต่มีอัตราการการเผาไหม้ที่รวดเร็วกว่า ทั้งยังมี COV_{imep} ที่ต่ำกว่าอยู่ระหว่าง 1-2% ทำให้เครื่องยนต์มีความเสถียรมากกว่าแก๊สโซลีน และการปลดปล่อยก๊าซมลพิษทั้ง HC และ CO ยังต่ำกว่าอยู่ในช่วง 203-221 ppm และ 2.0-2.5% ตามลำดับ จึงมีศักยภาพที่จะนำ hE100 มาใช้เป็นพลังงานทดแทนต่อไป เพื่อเป็นแนวทางส่งเสริมเกษตรกรและยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย และทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Bielaczyc, P., J. Woodburn, A. Szczotka and P. Pajdowski. 2015. The impact of alternative fuels on fuel consumption and exhaust emissions of greenhouse gases from vehicles featuring SI engines. **Energy Procedia** 66: 21-24.

Ceviz, M.A., A.K. Sen, A.K. Küleri and I.V. Öner. 2012. Engine performance, exhaust emissions, and cyclic variations in a lean-burn SI engine fueled by gasoline–hydrogen blends. **Applied Thermal Engineering** 36: 314-324.

Costa, R.C. and J.R. Sodre. 2010. Hydrous ethanol vs gasoline-ethanol blend: engine performance and emission. **Fuel** 89: 287-293.

Gupta, P., V. Sae-wang, P. Kanbua and Y. Laoonual. 2011. Impact of water contents blended with ethanol on SI engine performance and emissions. **Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering** 1: 7-11.

Heywood, J.B. 1988. **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill, Singapore.

Kim, N., S. Cho and K. Min. 2015. A study on the combustion and emission characteristics of an SI engine under full load conditions with ethanol port injection and gasoline direct injection. **Fuel** 158: 725-732.

Kumar, S., N. Singh and R. Prasad. 2010. Anhydrous ethanol: A renewable source of energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 14(7): 1830-1844.

Nilaphai, O. and S. Chuepeng. 2014. Preliminary study of hydrous ethanol as a fuel for spark ignition engine on performance and combustion. *In* **1st International Conference on Engineering Science and Innovative Technology**. 8-10 April 2014, Krabi, Thailand.

Saffy, H.A., W.F. Northrop, D.B. Kittelson and A.M. Boies. 2015. Energy, carbon dioxide and water use implications of hydrous ethanol production. **Energy Conversion and Management** 105: 900-907.

Wang, S., C. Ji and B. Zhang. 2010. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark-ignited ethanol engine at idle and stoichiometric conditions. **International Journal of Hydrogen Energy** 35: 9205-9213.

Ultrasound – Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Indigenous Vegetables In Southern Thailand

Supasit Chooklin[1*], Armenah Boojan[1], Darunee Rodruayruen[1], Weerapong Chiansong[1] and Sutasinee Sriwilai[1]

ABSTRACT

Ultrasound-assisted extraction has indicated numerous advantages over traditional extraction methods for extracting compounds based on plant materials. An objective of the investigation was to determine optimal conditions in an ultrasound-assisted extraction process of indigenous vegetables in the south of Thailand. Dried ground of indigenous vegetables (*Ficus racemosa* L. (Look ching), *Etlingera elatior* (Dok dala), *Curcuma longa* L. (Kamint) and *Glochidion perakense hook.f*. (Mun pu) in the south of Thailand (5 g, all edible part of indigenous vegetables) were subjected to ultrasound-assisted extraction at 35-75°C, ratio of raw material with ethanol (60% v v^{-1}) (1:15-1:30 mg mL^{-1}) and extraction time between 5-60 minutes. Extracts were filtered through filter paper (whatman no.1) and extracts obtained were used for determination of total phenolic content using Folin – Ciocalteu reagent and antioxidant activities using 2,2–diphenyl–1–picrylhydrazyl (DPPH). Results showed that total phenolic contents and antioxidant activities of *Glochidion perakense hook.f* was found to yield the highest total phenolic content and antioxidant activity (47.24±0.04 mg GAE g^{-1} DW and 52.74±0.68%, respectively). Optimum extraction conditions in ultrasound-assisted extraction from *Glochidion perakense hook.f* was as follows: solid to liquid ratio of 1:20 mg mL^{-1}, extraction temperature of 65°C and extraction time of 30 minutes. Under above-mentioned conditions, experimental total phenolic content and antioxidant activity was 61.50±0.25 mg GAE g^{-1} DW and 74.05±0.65%, respectively. *Glochidion perakense hook.f* was considered as a good source of natural antioxidants

Key Words: Ultrasound – assisted extraction, Phenolic compounds, Indigenous vegetables, Antioxidant activity

*Corresponding author: e-mail: **supasit_c@yahoo.co.th**

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Sri Thamarat, Thailand, 80240

INTRODUCTION

There is a growing interest concerning lipid oxidation because of its significance for food deterioration. Lipid oxidation is a complicated free radical chain process involving a variety of radicals formation. Oxidation is influenced by various parameters e.g. temperature, light, air, physical and chemical properties of the substrates, and presence of oxidation catalysis or initiators. Use of antioxidants in lipid-containing foods is one potential method to minimize rancidity, retard formation of toxic oxidation products, maintain nutritional quality and increase shelf-life of food products (Maisuthisakul *et al*. 2007). Since consumers are usually concerned about use of synthetic antioxidants, such as butylated hydroxyanisole (BHA), butylated hydroxytoluene (BHT), *tert*-butyl hydroxyquinone (TBHQ) and propyl, octyl, and dodecyl gallates in lipid-containing foods, synthetic antioxidants have been applied for decreasing lipid oxidation during storage of processed food products tend to cause possible worry among consumers. In addition, use of chemical additives has raised questions regarding food safety and toxicity (Chang *et al*. 1977). There is also an interest in developing natural antioxidants from plants.

Various parts of many Thai indigenous plants are used as food, beverage, medicine, or for chewing and these are potential sources of new natural antioxidants (Maisuthisakul *et al*. 2007). Thai native vegetables have been reported to be good sources of antioxidants, and many also consist of with anti-bacterial, anti-inflammatory, anti-mutagenic, and anti-carnogenic related compounds (Kongkachuichai *et al*., 2015). Extraction of antioxidant compounds from plants can be carried out in a variety of ways, for examples, traditional extractions (soxhlet, infusion and maceration), and supercritical fluid extraction. However, these methodologies have been employed for decades, it is important to mention that some of them could be a cause of degradation of targeted bioactive compounds due to high temperature and long extraction time used. There are also some health risk for analysts because of relatively large number of toxic solvents.

The conventional extraction methods of polyphenols from plants have some limitations regarding the high solvent consumption, the long extraction time requirement, the improvement of yield and quality of the extracts. Actually, ultrasound-assisted extraction (UAE) is widely used for extracting plant compounds in order to overcome these drawbacks (Porto *et al*., 2013). Ultrasonic-assisted extraction (UAE) has been proven to be one of the most promising techniques for extracting bioactive compounds from plants, and it is relatively adaptable on a small or large scale, in addition it is a promising technology due to cheaper and fewer instrumental requirements. Use of ultrasound can enhance extraction process efficacy by increasing mass transfer between solvents and plant materials. Collapse of cavitation bubbles leads to better cell disruption through formation of microjets due to asymmetrical bubble collapse near a solid surface. This permits for improved solvent

penetration into the plant body itself and can also break down cell walls (Toma *et al*. 2001). Application of UAE offers many advantages including: less amount of solvent, lower temperatures and shorter extraction time which is very useful for extraction of thermo-labile and unstable compounds and also increased extraction yield (Muniz-Marquez *et al*. 2013). Therefore, objectives of this work were to investigate influences of solid/liquid ratio, extraction time and extraction temperature by using UAE on total phenolic contents and antioxidant activities of the indigeneous vegeatable in the South of Thailand.

MATERIALS AND METHODS

Materials

Plant materials

Thai indigenous vegetables in Souhern Thailand were collected from Nakhon Sri Thamarat Province, Thailand and as authenticated by the corresponding author. Materials were washed thoroughly in potable water and dried in a hot air oven at 50°C, 10 hr, then ground to pass through a 0.25 mm sieve. Power was kept in sealed metalize bags and stored at room temperature until the analyses.

Chemicals and reagents

Ethanol and Folin-Ciocalteu's phenol regents were obtained from Merk, Bangkok, Thailand. Gallic acid and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) were purchased from Fluka Analyticals, Bangkok, Thailand. All chemicals and reagents were of analytical reagent grade.

Methods

Ultrasound-assisted extraction

Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from Thai indigenous vegetables in the south of Thailand was performed in an ultrasonic bath (120 W, 45 kHz) by employing some extraction variables including: solid/liquid ratio 1:15, 1:20, 1:25 and 1:30 g mL^{-1}, extraction temperature 35, 45, 55, 65 and 75°C and time of sonication 5, 15, 30 and 60 minutes consecutively.

Samples (5 g, all edible part of indigenous vegetables) were placed in 100 mL Erlenmeyer flasks and 100 mL of 60% volume per volume (v v^{-1}) ethanol was added. Sample was submitted to ultrasonic irradiation at different extraction conditions. Extracts obtained were filtered by vacuum filtration. Total phenolic contents of Thai indigenous vegetables extracts were determined using Folin-Ciocalteu method (Yingngam *et al*., 2014). All calculations about the quantitative analysis were compared with the calibration curve of gallic acid and the results were expressed as gallic acid equivalents (mg GAE g^{-1} dried sample) and antioxidant activities were calculated as follow,

inhibition (%) = $[A_0-(A_1-A_2)/A_0]$x100 where A_0, A_1, A_2 are the absorbance value of the DPPH solution without sample solution, test sample, and sample without DPPH solution, respectively (Yingngam *et al*., 2014).

Statistical analysis

All experiments were repeated 3 times; average and standard deviations were calculated. Statistical analysis was carried out and the comparisons of averages of each treatment were based on the analysis of variance (ANOVA) at significance level 5%. Values followed by the same letter are not statistically significant according to Duncan's multiple range test at significance level $p < 0.05$.

RESULTS AND DISCUSSION

Total phenolic contents and antioxidant activities in Thai indigenous vegetables

Phenolic compounds are very important vegetable constituents because they exhibit antioxidant activities by inactivating lipid free radicals or preventing decomposition of hydroperoxides into free radicals. The Folin-Ciocalteu method is a rapid and widely-used assay, to investigate the total phenolic contents but it is known that different phenolic compounds have different response to Folin-Ciocalteu method. Therefore, in this work, we calculated total phenolic contents in units of mg gallic acid equivalents of phenolic compounds as shown in Table 1. It was found that *Glochidion Perakense Hook.f* (Mun pu) obtain the highest total phenolic content and antioxidant activity (47.24±0.04 mg GAE g^{-1} DW and 52.74±0.68%, respectively). Kongkachuichai *et al*. (2015) and Tangkanakul *et al*. (2005) found that the total phenolic content of *Glochidion Perakense Hook.f* (Mun pu) was of 47.63 mg GAE g^{-1} DW and 49.06 mg GAE g^{-1} FW, respectively. The wide variation in total phenolic contents in vegetables might arise from the variety of the plant, plant portions, stage of ripening, place of cultivation, climate condition, fertilization, sample collection, transportation, sample preparation, and methods of analysis (Rop *et al*., 2011).

Table 1 Total phenolic content and antioxidant activity of indigenous vegetables in the southern Thailand.

Scientific name	Local name	Phenolic content (mg GAE g^{-1} DW)	Antioxidant activity (%)
Ficus racemasa L.	Look ching	18.61 ± 0.26[a]	36.42 ± 0.69[a]
Etlingera elatior	Dok dala	20.93 ± 0.34[a]	38.41 ± 0.69[b]
Curcuma longa L.	Kamint	34.11 ± 0.08[b]	43.04 ± 1.05[c]
Glochidion Perakense Hook.f.	Mun pu	47.24 ± 0.04[c]	52.74 ± 0.68[d]

[a-d] Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

Effects of extraction temperature on total phenolic content of *Glochidion Perakense Hook.f.*

Effects of extraction temperature on phenolic contents and antioxidant activities were probed. Results demonstrated that, when temperature increased from 35 to 65°C, phenolic contents and antioxidant activities of extracts increased (Table 2), which is possibly owing to high number of cavitational nuclei formed during higher extraction temperature as a consequence of high cavitation threshold which is accountable for acoustic cavitation. A relative greater force ruptured cavitational nuclei and disrupted cell tissues during extraction, which will enhance mass transfer (Toma *et al*. 2001). Moreover, increasing of temperature enhanced solubilities of phenolic compounds and diffusion coefficients of extraction solvent (Al-Farsi and Lee, 2008). When extraction temperature was above 65°C, phenolic contents and antioxidant activities decreased. It is true that higher temperature (40°C) may increase solubilities of phenolics (Japon-Lujan *et al*. 2006) but too high (60°C) may cause their degradation (Rostagno *et al*. 2007). Moreover, the temperature at 75°C, the efficiency decreased. It may from the effect of solvent evaporation to reduce the ratio between solvent to material. Mild heating might soften plant tissue, weaken cell wall integrity, hydrolyze bonds of bound phenolic compounds (phenol-protein or phenol-polysaccharide) as well as enhance phenolics solubility, thus more phenolics would distribute to solvent system (Spingno *et al*. 2007).

Table 2 Effect of extraction temperature on total phenolic content and antioxidant activity.

Extraction temperature (°C)	Phenolic contents (mg GAE g^{-1} DW)	Antioxidant activities (%)
35	47.23 ± 0.35^{a}	52.74 ± 0.69^{a}
45	49.21 ± 0.44^{a}	54.83 ± 1.35^{a}
55	58.72 ± 0.71^{b}	66.62 ± 0.80^{b}
65	61.20 ± 0.17^{b}	73.97 ± 2.75^{c}
75	42.32 ± 0.13^{a}	39.35 ± 2.34^{d}

$^{a-d}$ Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

Effects of solid/liquid ratios on total phenolic contents of *Glochidion Perakense Hook.f.*

In this study, ethanol was used as the extraction solvent because ethanol is safe and classified in class 3 pharmaceutical level according to the United Stage of Food and Drug Administration (US-FDA) (McConville, 2002) and can be easily recovered by reduced pressure distillation. In addition, according to Wang *et al*. (2008) found that ethanol extracts contained the highest content of total phenolics, followed by methanol extracts and acetone extracts. Table 3

showed effect of solid/liquid ratio extraction phenolic compounds. Results indicated that effects of solid/liquid ratio on the phenolic contents and antioxidant activities of extracts were variables that were considerably affected during extraction of phenolic compounds. It can be observed that, when a liquid/solid ratio increases from 15 to 20, phenolic content and antioxidant activity would increase. One of probable explanations for this phenomenon is that usually usage of larger volume of solvent could obtain larger amount of bioactive compounds (Xia *et al*. 2011), as it could accelerate diffusion of compounds, which could be favorable for increase of phenolic contents (Lui *et al*. 2010). Moreover, concentration differences between interior plant cells and exterior solvent were caused by higher solid-liquid ratios, which could dissolve more constituents (phenolic compounds) more effectively and lead to an enhanced mass transfer rate and increase the extraction yield (Toma *et al*. 2001). By further increase in solvent-to-material ratio, a decline in phenolic contents and antioxidant activities was above 20 mL g^{-1}. This indicated that a larger volume of solvent did not improve the driving force. Similar results were also reported by other researchers (Gan *et al*., 2011; Wang *et al*., 2013; Yingngam *et al*., 2014).

Table 3 Effects of solid/liquid ratio on total phenolic content and antioxidant activity.

Solid/liquid ratios (mg mL^{-1})	Phenolic contents (mg GAE g^{-1} DW)	Antioxidant activities (%)
1:15	52.91 ± 0.14[a]	58.45 ± 1.74[a]
1:20	61.20 ± 0.16[b]	73.97 ± 2.75[b]
1:25	48.32 ± 0.32[c]	45.94 ± 0.63[c]
1:30	45.00 ± 0.93[c]	41.65 ± 1.48[d]

[a-d] Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

Effects of extraction time on total phenolic content of ***Glochidion Perakense Hook.f.***

Contents of the phenolic compounds and antioxidant activities extracted at different times of sonication were presented in Table 4. A substantial increase of phenolic contents and antioxidant activities were observed over the specified extraction period (5-60 minutes), and phenolic compounds and antioxidant activities reached a maximum of approximately 61.00±0.25 mg GAE g^{-1} DW and 73.85±0.52%, respectively. Mass transfer controls a solvent extraction of any component from a plant matrix; when solvent saturates, extracted compounds, concentration gradient becomes null and an ultrasound extraction of phenolic compound from *Glochidion Perakense Hook.f,* ceases and finally mass transfer stopped after 30 minutes and the process can then be interrupted.

Table 4 Effects of extraction time on total phenolic contents and antioxidant activity.

Extraction time (minutes)	Phenolic contents (mg GAE g^{-1} DW)	Antioxidant activities (%)
5	15.22±0.32[a]	37.42±0.51[a]
15	34.83±0.16[b]	45.67±0.83[b]
30	61.00±0.25[c]	73.85±0.52[c]
60	61.20±0.10[c]	73.84±0.64[c]

[a-c] Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

Results obtained from these experiments showed that the optimum extraction conditions for extracting the phenolic content from *Glochidion Perakense Hook.f* extracts were obtained by ultrasound-assisted extraction at liquid to solid ratio 20, extraction temperature 65°C, extraction time 30 minutes which produced maximal phenolic content of 61.50±0.25 mg GAE g^{-1} DW and antioxidant activities of 74.05±0.65%.

CONCLUSION

Glochidion perakense hook.f can be regarded as a good source of natural antioxidants. Moreover, The best condition based on four types of Thai indigenous vegetables in Southern Thailand with ultrasound-assisted extraction was solid/liquid ratio 1:20 (g L^{-1}), extraction temperature 65°C, and extraction time 30 minutes with ethanol 60% v v^{-1}.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Faculty of Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thamarat, Thailand.

REFERENCES

Al-Farsi, M.A. and Lee, C.Y. 2008. Optimization of phenolics and dietary fibre extraction from date seeds. **Food Chemistry**, 108(3): 977-985.

Chang, S.S., Ostric-Matijasevic, B., Hsieh, O.A. and Chang, C.L. 1977. Natural antioxidants from rosemary and sage. **Journal of Food Science**, 42: 1102-1106.

Gan, C.Y. and Latiff, A.A. 2011. Optimization of the solvent extraction of bioactive compounds from *Parkia speciosa* pod using response surface methodology. **Food Chemistry**, 124: 1277-1283.

Japon-Lujan, R., Luque-Rodriguez, J.M. and Luque de Castro, M.D. 2006. Dynamic ultrasound-assisted extraction of oleuropein and related biophenols from olive. **Journal of Chromatography A**, 1108: 76-82.

Kongkachuichai, R., Charoensiri, R., Yakoh, K. and Kringkasemsee, A. 2015. Nutrients value and antioxidant content of indigeneous vegetables from Southern Thailand. **Food Chemistry**, 173: 838-846.

Lui, Q.M., Yang, X.M., Zhang, L. and Majetich, G. 2010. Optimization of ultrasonic - assisted extraction of chlorogenic acid from *Folium eucommiae* and evaluation of its antioxidant activity. **Journal of Medical Plants Research**, 23: 2503-2511.

McConville, F.X. 2002. The pilot plant real book a unique handbook for the chemical process industry. 1st ed Massachusetts: FXM Engineering and Design.

Maisuthisakul, P., Suttajit, M. and Pongsawatmanit, R. 2007. Assesment of phenolic content and free radical-scavenging capacity of some Thai indigenous plants. **Food Chemistry**, 100: 1409-1418.

Muniz-Marquez, D.B., Martinez-Avila, G.C., Wong-Paz, J.E., Belmares-cerda, R., Rodriguez-Herra, R. and Aguila, C.N. 2013. Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Laurus nobilis* L. and their antioxidant activity. **Ultrasonics Sonochemistry**, 20: 1149-1154.

Porto, C.D., Porretto, E. and Decorti, D. 2013. Comparison of ultrasound-assisted extraction with conventional extraction methods of oil and polyphenols from grape (*Vitis vinifera* L.) seeds. **Ultrasonics Sonochemistry**, 20: 1076-1080.

Rop, O., Sochor, J., Jurikova, T., Zitka, O., Skutkova, H. and Micek, J. 2011. Effect of five different stages of ripening on chemical compounds in Medlar (*Mespilus germanica* L.). **Moleciles**, 16: 74-91

Rostagno, M.A., Palma, M. and Barroso, C.G. 2007. Ultrasound-assisted extraction of isoflavones from soy beverage blended with fruit juices. **Analytical Chimica Acta**, 597: 265-272.

Spingno, G., Tramelli, L. and Faveri, D.M.D. 2007. Effects of extraction time, temperature and solvent on concentration and antioxidant activity of grape marc phenolics. **Journal of the Science of Food and Agricultural**, 87: 2817-2822.

Tangkanakul, P., Trakoontivakorn, G. and Jariyavattanavijit, C. 2005. Extracts of Thai indigeneous vegetables as rancid inhibitor in a model. **Kasetsart Journal (Natural Science)**, 39: 274-283.

Toma, M., Vinatoru, M., Paniwnyk, L. and Mason, T.J. 2001. Investigation of the effects of ultrasound on vegetal tissues during solvent extraction. **Ultrasonics Sonochemistry**, 8: 137-142.

Wang, J., Sun, B., Cao, Y., Tian, Y. and Li, X. 2008. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from wheat bran. **Food Chemistry**, 106: 804-810.

Wang, X., Wu, Y., Chen, G., Yue, W., Liang, Q. and Wu, Q. 2013. Optimisation of ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from Sparganii rhizoma with response surface methodology. **Ultrasonics Sonochemistry**, 20: 846-854.

Xia, E.Q., Ai, X.X., Zang, S.Y., Guan, T.T., Xu, X.R and Li, H.B. 2011. Ultrasound-assisted extraction of phyllyrin from *Forsythia suspense*. **Ultrasonics Sonochemistry**, 18: 549-552.

Yingngam, B., Monschein, M. and Brantner, A. 2014. Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from Cratoxylum formosum ssp. Leaves using central composite design and evaluation of its protective ability against H_2O_2-induced cell death. **Asian Pacific Journal of Tropical Medicine**, 7 (Suppl 1): s497-s505.

สมบัติการคงรูป เชิงกล และการกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้

Cure Characteristics, Mechanical and Neutron/Gamma Shielding properties of Wood-Natural Rubber Composites

กีรติกานต์ นิลยอง[1*] เอกชัย วิมลมาลา[1] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ[1] และ เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง[2]

Keeratikarn Ninyong[1*], Ekachai Wimolmala[1], Narongrit Sombatsompop[1] and Kiadtisak Saenboonruang[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวเติมป้องกันรังสีชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วนในยางร้อยส่วน (phr) ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติและวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ตรวจสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านรังสี ผลการวิจัยพบว่า การเติมกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้น ส่วนการเติมโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ ส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปลดลง และสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้มีแนวโน้มลดลง ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิว ส่วนการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางไม่ส่งผลต่อเวลาการคงรูปยาง และมีสมบัติเชิงกลโดยรวมไม่ต่างกัน จากการศึกษาสมบัติด้านรังสี พบว่า การเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณการเติม 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้สามารถต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น และมีความสามารถต้านทานต่อรังสีเทียบเท่าเกณฑ์เป้าหมาย ส่วนการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางสามารถต้านทานต่อรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ABSTRACT

This research aims to investigate effects of radiation protection agents: boric acid, boron oxide, and lead powders, with the contents of 0, 10, 20, 30, 40, and 50 phr (parts per hundred of rubber) in natural rubber composite and wood-natural rubber composite. Properties that are investigated include scorch time, cure time, mechanical properties, and radiation shielding properties. Results indicate that adding boric acid to the composites increases the scorch time and cure time, while boron oxide decreases the scorch time and cure time. Moreover, all mechanical properties but hardness decrease as the contents of the radiation agents increases. On the other hand, lead powder does not significantly affect the scorch time, cure time, and mechanical properties. In the case of radiation shielding properties, the ability to shield neutrons increases as the content of boric acid and boron oxide increases. Specifically, at the 50 phr boron oxide content, the neutron shielding properties pass the properties targets measured from commercial products. In addition to boric acid and boron oxide, lead powder can shield gamma ray, however, in small percentages.

Key Words: Natural rubber / Filler / Mechanical properties / Radiation properties

*Corresponding author; e-mail address: lnking_001@hotmail.com

[1]กลุ่มวิจัย P-PROF คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[1]P-PROF research group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

[2]ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[2]Department of Applied Radiation and Isotope, Faculty of Science, Kasetsart University

คำนำ

ปัจจุบันมีการนำรังสีไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ เช่น การรักษาโรคในงานด้านการแพทย์ การตรวจสอบวัสดุด้านอุตสาหกรรม และการถนอมอาหารและเมล็ดพันธุ์ในด้านเกษตร เป็นต้น แต่การใช้งานด้านรังสีอาจให้โทษต่อร่างกายมนุษย์ เมื่อมีการสัมผัสกับรังสีเป็นเวลานาน และในระยะที่ใกล้เกินไป หรือกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงรังสีได้ ดังนั้นในงานทั่วไปจึงมีการนำแผ่นกำบังรังสีมาใช้ในงานต่างๆ เช่น วัสดุพอลิเอทิลีนผสมผงโบรอน แต่วัสดุดังกล่าวไม่สามารถดัดโค้งได้ ดังนั้น จึงมีการนำวัสดุยางธรรมชาติซึ่งมีความยืดหยุ่นที่ดี ไปใช้ในการป้องกันรังสีโดยการเติมผงตะกั่วเพื่อยับยั้งรังสีแกมมา (Gwaily และ Madani, 2002) และสารประกอบที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ เช่น กรดบอริก (H_3BO_3) และโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เพื่อใช้ในการยับยั้งอนุภาคนิวตรอน (Gwail S.E. *et al*, 2002) ซึ่งอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ ทำให้ยากต่อการป้องกัน อนุภาคนิวตรอนสามารถเกิดขึ้นได้จากการใช้งานด้านรังสีในหน่วยงานต่างๆ เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์หรือเตาปฏิกรณ์ และห้องฉายรังสีในโรงพยาบาล เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (กลุ่มวิจัย P-PROF) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2552; Hamaviriyaporn N. *et al*, 2012) ที่มีการศึกษานำยางธรรมชาติผสมกับผงขี้เลื่อยไม้ยางพาราและสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับยางธรรมชาติให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้จริง ที่มีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง ทนทานต่อสภาพภูมิอากาศ และความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีการต่อยอดองค์ความรู้จากงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการนำผงขี้เลื่อยไม้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยมีแนวคิดขยายผลจากสมบัติทางเชิงกลที่ดีมาใช้งานด้านกำบังรังสีและความร้อนที่เกิดจากการใช้งาน ซึ่งมีงานวิจัยทางวัสดุด้านป้องกันรังสีน้อยมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาชนิดและปริมาณการใช้สารป้องกันรังสี (กรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว) เป็นสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ทดสอบสมบัติการคงรูปยาง ทางเชิงกล ทางกายภาพ และความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา

อุปกรณ์และวิธีการ

เกณฑ์เป้าหมายผลิตภัณฑ์ป้องกันรังสี

คณะวิจัยได้นำชิ้นงานผลิตภัณฑ์ยางสำหรับใช้งานป้องกันรังสีที่นำเข้าจากบริษัท โชวา รับเบอร์ จำกัด ประเทศญี่ปุ่น ที่มีความหนา 5.13 เซนติเมตร (Data sheet Showa-Rubber Co., Ltd, 2013) โดยมีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งที่ผิว 69 ชอร์เอ ความต้านทานแรงดึง 6.48 เมกะปาสคาล เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด 432 และค่าความสามารถในการป้องกันรังสี 169.75 ต่อเมตร

วัสดุ/สารเคมี ขั้นตอนการผสม และการเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษา 2 ระบบ ดังนี้ 1) เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทที่ปริมาณคงที่ 40 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ปริมาณ 0-50 phr และ 2) เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเขม่าดำชนิดมาสเตอร์แบทที่ปริมาณคงที่ 40 phr ที่เติมผงขี้เลื่อยไม้ขนาดอนุภาค 75-100 ไมครอน ปริมาณคงที่ 20 phr และปรับเปลี่ยนปริมาณกรดบอริก ผงโบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว ที่ปริมาณ 0-50 phr ด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จากบริษัท

ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ตามส่วนประกอบของยางที่แสดงใน Table 1 เวลาในการผสม 30 นาที อุณหภูมิการผสมในช่วง 40-45 องศาเซลเซียส นำวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเตรียมขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) จากบริษัท แลป เทค อินจิเนียริ่ง จำกัด อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 160 องศาเซลเซียส แรงดันแม่พิมพ์ที่ 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยแม่พิมพ์ตัดเป็นรูปดัมเบลล์

Table 1 Formula of natural rubber compounds

Ingredients	Content (phr*)	Function	Commercial source
Natural Rubber: STR 20	100 (Part)	Matrix	PI Industry Co., Ltd.
Zinc oxide, ZnO	5	Activator	Thai-Lysaght Co., Ltd.
Stearic acid	3 (2)	Activator	Imperial Industrial Chemicals Co., Ltd.
Mercaptobenzthaisoles, MBT	2 (0.5)	Accelerator	CMC advance Co., Ltd.
Diphenylguanidine, DPG	3 (2)	Accelerator	Siam Chemicals Co., Ltd.
Sulphur powder	4 (3)	Cross-linker	Zeon advanced Polymix Co., Ltd.
Carbon Black master batch (HAF N330)	40	Reinforcing	PI Industry Co., Ltd.
Wood sawdust	20	Filler	V.P. Wood Co., Ltd.
Silane Coupling (KBM 603A)	0.5% / Weight Wood sawdust	Coupling agent	KISCO (T) Ltd.
UV Stabilizer (TINUVIN 234)	0.1	UV absorber	Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
Anti-oxidant (IRGANOX 1076)	0.5	Anti-oxidant	Global Connections PLC.
Anti-Ozonant (Enhance)	3	Anti-Ozonant	Behn Meyer Chemical (T) Co., Ltd.
Radiation protection agent			
- Boric acid	Varying from	Radiation	Siam Beta Group Co., Ltd.
- Boron oxide	0-50	protection agent	Sigma-Aldrich Co., Ltd.
- Lead powder			Pun Engineering Co., Ltd.

**phr : part per hundred of rubber by weight , numbers in ( ) represents improved formula used in wood-natural rubber composites.*

ขั้นตอนการทดสอบสมบัติการคงรูป สมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาค

นำยางคอมปาวด์ที่ได้จากเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (ts_1) และเวลาในการคงรูปยางที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (tc90) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer; ODR) จาก บริษัท โกเท็ค เท็ดดิ่ง แมชชีน อินดัสเตรียล จำกัด รุ่น GT 70 - 70 S2, ประเทศไต้หวัน ตามมาตรฐาน ASTM D2084 - 01 อุณหภูมิในการทดสอบ 160 องศาเซลเซียส ขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล ด้านความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท ชิมาสุ จำกัด รุ่น Autograph AG-I 5kN ประเทศญี่ปุ่น และค่าความแข็งของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 (Shore A) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจากบริษัท เทคล็อค จำกัด และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รุ่น JSM-6610LV ยี่ห้อ JEOL จากประเทศญี่ปุ่น ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์

ขั้นตอนการทดสอบทางด้านรังสี

นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงกรดบอริก และผงโบรอนออกไซด์ ทดสอบความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมผงตะกั่ว ทดสอบความต้านทานต่อรังสีแกมมา โดยในงานวิจัยนี้ใช้ระบบ Integral counting system ทดสอบจำนวน 5 ครั้งต่อชิ้นงาน และคำนวณหาค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอน และรังสีแกมมา (ที่หลุดจากการดูดซับอนุภาคนิวตรอน) ดังแสดงใน **สมการที่** 1

สูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient, μ)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

$$\mu = \frac{-\ln(\frac{I}{I_0})}{x} \quad \text{..... (1)}$$

โดยที่ I_0 คือ ความเข้มของรังสีก่อนผ่านชิ้นงาน

I คือ ความเข้มของรังสีหลังผ่านชิ้นงาน

x คือ ความหนาของชิ้นงาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบเวลาที่ยางเริ่มการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านรังสีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ดังแสดงใน Table 2 และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ดังแสดงใน Table 3 ที่มีการเติมสารตัวเติมชนิดกรดบอริก โบรอนออกไซด์ และผงตะกั่ว โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr พบว่า เมื่อเติมผงโบรอนออกไซด์ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป แต่การเติมกรดบอริกส่งผลทำให้มีเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผงกรดบอริกมีฤทธิ์เป็นกรดทำหน้าที่เป็นสารหน่วงปฏิกิริยาก่อนการเกิดการคงรูป และเมื่อพิจารณาเวลาที่ยางคงรูป พบว่า การเติมกรดบอริกที่ปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้เวลาการคงรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกรดบอริกเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่หน่วงประสิทธิภาพการทำงานของสารกระตุ้นและสารตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เวลาการเกิดปฏิกิริยาคงรูปเพิ่มขึ้น (พงษ์ธร, 2548) ส่วนในกรณีการเติมโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณตั้งแต่ 10 phr พบว่า เวลาในการคงรูปยางลดลง เนื่องจากผงโบรอนออกไซด์มีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วม (Co-activator) ในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้เร็วขึ้นทำให้เวลาที่ยางคงรูปลดลง และพบว่าเวลาการคงรูปไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณโบรอนออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่วนการเติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป และเวลาการคงรูปของยาง ทั้งนี้เนื่องจากผงตะกั่วไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับยางธรรมชาติ

ส่วนสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมกรดบอริก และโบรอนออกไซด์ส่งผลทำให้ค่าความแข็งที่ผิว มอดุลัสแรงดึง ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางและสารตัวเติมดังกล่าวอาจจะมีปริมาณการเชื่อมขวาง (Crosslink density) ที่น้อย ทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีความสามารถต้านทานต่อการเสียรูปที่ไม่ดี (ศิริกุล, 2555) และเกิดความไม่เข้ากันของสารตัวเติมกับเฟสของยางเมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้นเกิดการหลุดออกของสารตัวเติมเกิดรูพรุน ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟสยางเมื่อเทียบกับ

ไม่เติมสารตัวเติม แสดงดัง Figure 1 (a และ b) ส่วนวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ที่เติมผงโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 50 phr แสดงดัง Figure 1 (c) ที่มีค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง ส่วนกรณีการเติมผงตะกั่วไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิว และมอดุลัสแรงดึง แต่ทำให้ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากผงตะกั่วมีค่าความหนาแน่น (Density) ค่อนข้างสูง จึงส่งผลทำให้เป็นสารตัวเติมกระจายในเฟสของยางได้ยาก และไม่เกิดพันธะทางเคมีกับยางธรรมชาติจึงไม่มีการเสริมแรงให้กับยาง อีกทั้งอนุภาคของผงตะกั่วเข้าไปแทนที่ยางธรรมชาติที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก ทำให้ส่วนที่เป็นเฟสยางลดลง ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางมีการยืดตัวและมีสมบัติความเป็นอิลาสติกของยางลดลง และพบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้มีค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่ากรณีไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ เนื่องจากอนุภาคผงขี้เลื่อยไม้มีความแข็งแกร่ง (Rigidity) สูง เมื่อเติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ทำให้ค่าความแข็งที่ผิวโดยรวมเพิ่มขึ้น (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2552)

Table 2 Cure, mechanical and radiation shielding properties of natural rubber composites

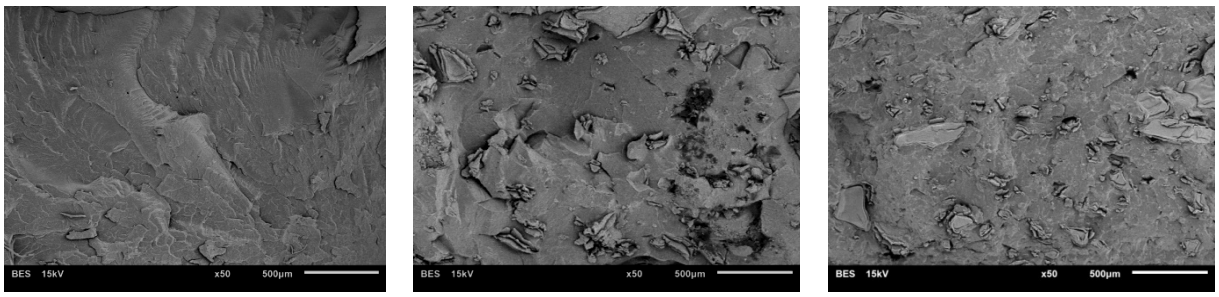
Sample code content (phr)	Cure properties		Mechanical properties				Radiation properties
	Scorch time (sec)	Cure time (sec)	Moduslus; M100 (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore A)	Linear attenuation coefficient,μ (m^{-1})
NR-CB	34 ± 2.12	184 ± 0.71	3.75 ± 0.02	14.47 ± 0.99	316 ± 19	74 ± 1	8.04 ± 6.57
Boric acid : BA							
NR-CB-10BA	40 ± 5.2	196 ± 7.94	2.76 ± 0.05	16.2 ± 1	501 ± 18	69 ± 1	45.99 ± 8.66
NR-CB-20BA	47 ± 4.51	228 ± 2.65	1.88 ± 0.02	10.02 ± 0.37	526 ± 13	65 ± 1	73.76 ± 9.92
NR-CB-30BA	49 ± 2.31	272 ± 2.65	1.68 ± 0.04	7.51 ± 0.17	491 ± 14	61 ± 2	90.1 ± 6.22
NR-CB-40BA	74 ± 8.74	433 ± 9.54	1.39 ± 0.04	4.85 ± 0.09	454 ± 11	57 ± 2	103.87 ± 6.54
NR-CB-50BA	81 ± 2.89	609 ± 7.94	1.29 ± 0.03	4.28 ± 0.07	445 ± 8	51 ± 1	114.62 ± 4.97
Boron oxide : BO							
NR-CB-10BO	41 ± 3.21	109 ± 1.53	1.09 ± 0.01	12.61 ± 0.57	784 ± 25	53 ± 1	64 ± 5.3
NR-CB-20BO	35 ± 1.73	99 ± 1.73	1.3 ± 0.03	9.38 ± 0.45	638 ± 22	57 ± 1	93.29 ± 3.99
NR-CB-30BO	37 ± 2.65	101 ± 2.65	1.41 ± 0.06	8.1 ± 0.22	586 ± 21	62 ± 1	128.62 ± 3.91
NR-CB-40BO	35 ± 1.53	97 ± 0	1.58 ± 0.06	7.04 ± 0.29	507 ± 21	66 ± 1	134.13 ± 2.96
NR-CB-50BO	33 ± 1.73	98 ± 2.65	2.03 ± 0.05	6.43 ± 0.23	432 ± 15	68 ± 1	153.95 ± 6.54
Lead powder : Pb							
NR-CB-10Pb	35 ± 1.53	200 ± 1.73	3.69 ± 0.06	11.02 ± 1.22	262 ± 26	70 ± 2	1.36 ± 3.85
NR-CB-20Pb	34 ± 2.89	205 ± 2.31	3.66 ± 0.04	9.21 ± 2.45	228 ± 52	69 ± 1	10.34 ± 3.18
NR-CB-30Pb	35 ± 2.31	206 ± 2.89	3.66 ± 0.07	7.8 ± 0.99	197 ± 22	71 ± 1	11.92 ± 3.63
NR-CB-40Pb	34 ± 1	204 ± 1.53	3.53 ± 0.04	7.89 ± 1.46	213 ± 34	70 ± 2	12.71 ± 4.06
NR-CB-50Pb	34 ± 1.15	208 ± 3.61	3.59 ± 0.1	6.48 ± 1.37	178 ± 33	71 ± 1	20.65 ± 3.88

จากผลทดสอบสมบัติด้านรังสี พบว่า การเติมโบรอนออกไซด์ และการเติมกรดบอริก ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีความสามารถในการป้องกันอนุภาคนิวตรอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของโบรอนออกไซด์และกรดบอริก ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Onjun *et al* (2014) เนื่องจากสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดมีโบรอนเป็นส่วนประกอบเมื่อสัมผัสกับอนุภาคนิวตรอน นิวเคลียสของโบรอนสามารถดูดซับ (Absorbed) อนุภาค

นิวตรอนไว้ภายใน ซึ่งการดูดซับอนุภาคนิวตรอนไว้โดยการใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์นี้ นอกจากจะมีการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาแล้วยังมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมาด้วยเช่นกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพื่อป้องกันรังสีแกมมาที่เกิดจากการดูดซับ (Absorbed) ของอนุภาคนิวตรอน โดยการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติทำให้มีความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคุณสมบัติด้านความหนาแน่นของวัสดุส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสีแกมมาโดยตรง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gwail S.E. *et al*. (2002) และพบอีกว่า การเติมกรดบอริกและผงโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณ 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ มีค่าด้านรังสีเทียบเท่าเกณฑ์เป้าหมายผลิตภัณฑ์ โดยที่ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง ยกเว้นสมบัติด้านความแข็งที่ผิว

Table 3 Cure, mechanical and radiation shielding properties of wood-natural rubber composites with improved formula.

Sample code content (phr)	Cure properties		Mechanical properties				Radiation properties
	Scorch time (sec)	Cure time (sec)	Moduslus; M100 (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore A)	Linear attenuation coefficient,μ (m^{-1})
NR-CB-WS	42 ± 7.78	222 ± 12.02	3.73 ± 0.07	15.45 ± 0.31	460 ± 10	73 ± 1	20.04 ± 4.14
Boric acid : BA							
NR-CB-WS-10BA	56 ± 5.57	376 ± 11.53	2.12 ± 0.03	5.04 ± 0.17	337 ± 11	65 ± 1	51.33 ± 3.03
NR-CB-WS-20BA	101 ± 10.97	1080 ± 11	1.31 ± 0.06	2.5 ± 0.02	310 ± 12	60 ± 1	63.32 ± 11.19
NR-CB-WS-30BA	155 ± 10.26	1533 ± 11.13	1.3 ± 0.05	1.94 ± 0.05	234 ± 19	58 ± 1	87.42 ± 3.53
NR-CB-WS-40BA	1.59 ± 10.97	1566 ± 9.87	1.23 ± 0.01	1.62 ± 0.05	194 ± 7	57 ± 1	89.66 ± 8.14
NR-CB-WS-50BA	2.1 ± 23.33	1609 ± 41.01	1.32 ± 0.05	1.44 ± 0.12	135 ± 14	55 ± 1	97.67 ± 3.15
Boron oxide : BO							
NR-CB-WS-10BO	41 ± 3.79	206 ± 7.37	3.05 ± 0.05	9.21 ± 0.49	379 ± 14	70 ± 1	56.79 ± 6.6
NR-CB-WS-20BO	49 ± 10.61	202 ± 9.19	2.72 ± 0.09	6.72 ± 0.5	336 ± 21	72 ± 1	99.89 ± 4.75
NR-CB-WS-30BO	43 ± 2.52	173 ± 2.31	2.53 ± 0.08	5.11 ± 0.05	303 ± 11	70 ± 1	108.84 ± 4.08
NR-CB-WS-40BO	41 ± 2.89	125 ± 1.53	2.12 ± 0.02	4.34 ± 0.07	331 ± 5	73 ± 1	146.76 ± 7.89
NR-CB-WS-50BO	49 ± 2.52	1021 ± 67.12	2.33 ± 0.07	3.19 ± 0.07	238 ± 12	76 ± 1	169.68 ± 6.08
Lead powder : Pb							
NR-CB-WS-10Pb	40 ± 4.95	250 ± 12.73	4.03 ± 0.05	14.04 ± 1.07	391 ± 24	75 ± 1	0.89 ± 3.97
NR-CB-WS-20Pb	38 ± 1.15	220 ± 1.73	3.7 ± 0.08	13.39 ± 0.56	411 ± 11	75 ± 1	8.6 ± 1.93
NR-CB-WS-30Pb	38 ± 2.83	219 ± 1.41	3.62 ± 0.12	12.1 ± 0.59	387 ± 29	73 ± 1	7.67 ± 0.84
NR-CB-WS-40Pb	37 ± 0.71	220 ± 0	3.45 ± 0.15	11.07 ± 0.6	372 ± 8	75 ± 1	10.27 ± 3.49
NR-CB-WS-50Pb	37 ± 2.65	222 ± 1.73	3.52 ± 0.02	10.94 ± 0.25	368 ± 8	75 ± 1	9.91 ± 1.87



(a) (b) (c)

Figure 1 SEM images of the natural rubber composites (a) without radiation protection agent (b) natural rubber composites with boron oxide 50 phr and (c) wood-natural rubber composites with boron oxide 50 phr

สรุปผลการวิจัย

1. การเติมผงกรดบอริกในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ส่งผลทำให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปเพิ่มขึ้น แต่การเติมผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ส่งผลทำให้เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ยางคงรูปลดลง ส่วนสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้มีค่าลดลง ยกเว้นค่าความแข็งที่ผิว และการเติมผงตะกั่วในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้มีผลการทดลองเหมือนสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด

2. การเติมผงกรดบอริกและผงโบรอนออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณการเติม 50 phr และการเติมผงตะกั่วทำให้วัสดุเชิงประกอบยางต้านทานต่อรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

3. การเติมกรดบอริกและโบรอนออกไซด์ที่ปริมาณการเติม 50 phr ในวัสดุเชิงประกอบยางที่เติมและไม่เติมผงขี้เลื่อยไม้ สามารถต้านทานต่ออนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้น และมีความสามารถต้านทานต่อรังสีเทียบเท่าเกณฑ์เป้าหมาย

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (สัญญาเลขที่ RDG5750096) และโครงการวิจัยมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.)ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ บริษัท วี.พี. วู๊ด จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงขี้เลื่อยไม้ และบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสารเคมียาง

เอกสารอ้างอิง

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา, ธีระศักดิ์ หมากผิน และ ชัชวาลย์ กันทะลา,. 2552. **การพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคายางจากวัสดุผสมยาง ธรรมชาติกับผงขี้เลื่อยไม้** - การประชุมวิชาการวิจัยยางพารา โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ่ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (Research on NR. ศูนย์ประชุมอิมแพค เมืองทองธานี นนทบุรี.

พงษ์ธร แซ่อุย. 2548. **ยาง : ชนิดสมบัติและการใช้งาน**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(เอ็มเทค).

ศิรกุล กาญจนปฐมพร. 2555. **การใช้โบรอนออกไซด์เพื่อผลิตเป็นวัสดุกำบังรังสีนิวตรอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Gwaily S.E. and Madani M. 2002. Lead-Natural Rubber Composites as Gamma Radiation Shields. II: High Concentration. **Polymer Composites** 23: 495-499.

Gwail S.E., Hassan H.H., Badawy M.M. and Madani M. 2002. Natural Rubber Composites as Thermal Neutron Radiation Shields. **Polymer Testing** 21: 513-517.

Hamaviriyaporn N., Sombatsompop N., markpin T., Kositchaiyong A. and Wimolmala E. 2012. Solar reflectance, Surface Adhesion and Thermal Conductivity of Wood/NR Composite Sheet with TiO_2/PU Topcoat for Roofing Applications. **Journal of Vinyl & Additive Technology** 18: 184-191.

Neutron Shielding Rubber. 2013. **Showa-Rubber Co.,Ltd., challenging the potential of rubber. (Japan)**. Available Source: http://www.showa-rubber.co.jp/en/products/neutron.php, October, 14, 2015.

Onjun O., Laothong N., Picha R., Ratanathongchai W. and Onjun T. 2014. Natural Rubber blocks as Thermal Neutron Shields. **Progress in Nuclear Science and Technology** 4: 631-634.

การสร้างและประเมินเครื่องยีน้ำตาลโตนดผง

Manufacturing and Evaluation of the Jaggery Powder Crusher Machine

วิมล บุญรอด[1*] สุจริต สิงหพันธุ์[1] และ ฤทัย ประทุมทอง[1]

Wimon Boonrawd[1*], Sujarit Singhapan[1] and Ruthai Pratoomthong[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องยีน้ำตาลโตนดผง จากการทดลองพบว่าระยะเวลาในการยีน้ำตาลโตนดผงจะใช้เวลาเฉลี่ย 28 นาทีต่อครั้ง และสามารถผลิตน้ำตาลโตนดผงได้เฉลี่ย 4 กิโลกรัมต่อครั้ง ผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน และวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติพบว่าคะแนนเฉลี่ยจากทั้ง 3 ด้าน คือ ด้านโครงสร้าง ด้านการใช้งาน และด้านผลผลิตของเครื่องเท่ากับ 4.52 ผลการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยีน้ำตาลโตนดผง พบว่าเครื่องยีน้ำตาลโตนดผงสามารถผลิตน้ำตาลโตนดผงได้โดยที่คุณภาพของน้ำตาลโตนดผง เช่น สี กลิ่น ขนาดของผง ไม่แตกต่างจากการยีโดยใช้แรงงานคน โดยภาพรวมของเครื่องยีน้ำตาลโตนดผงนี้อยู่ในระดับดีมาก

คำสำคัญ: น้ำตาลโตนดผง การออกแบบ การยี

ABSTRACT

The objectives of the study were to design and manufacture a jaggery powder crusher machine. The results indicated that jaggery powder crushing took 28 minutes per one operation on the average and could produce jaggery powder around 4 kilograms per one operation. The result of satisfaction assessment from 5 specialists and analysis by statistical method showed that the average score in 3 parts: structure, usability and product of the machine was 4.52. The result of the tests to determine the operational efficiency of this machine indicated that it could produce jaggery powder and the quality, for example, color, smell and size of powder was not different from crushing by manpower. The overall perception of this machine was very good.

Key Words: jaggery powder, design, crush machine

*Corresponding author; e-mail address : Wimonmie@gmail.com

[1] คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 90000

[1] Faculty of Industrial Education and Technology Rajamangala University of Technology Srivijaya 90000

คำนำ

การผลิตน้ำตาลเพื่อใช้ในการบริโภคและการจำหน่ายในทางภาคใต้ของประเทศไทยนั้น ชาวบ้านนิยมผลิตน้ำตาลจากน้ำตาลโตนด เช่น น้ำตาลแว่น น้ำตาลปึก น้ำตาลปี๊บ ซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ได้จากตาลโตนดจะมีกลิ่นหอม รสหวานตามธรรมชาติและมีสีสวยงาม การผลิตน้ำตาลโตนดพบมากในจังหวัดเพชรบุรี นครศรีธรรมราชและสงขลา (ฐิติมา, 2548) จากการศึกษายังพบอีกว่ารัฐบาลได้ส่งเสริม สนับสนุนให้แต่ละท้องถิ่นมีผลิตภัณฑ์ประจำชุมชน ในลักษณะอุตสาหกรรมขนาดเล็กและเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากภูมิปัญญาท้องถิ่น (ประยุทธ, 2551)

กลุ่มโหนดนาเล ตำบลท่าหิน อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา เป็นกลุ่มที่เกิดจากการรวมตัวของชาวบ้านในชุมชนเพื่ออนุรักษ์และสืบสานประเพณีและวิถีชุมชน มีผลิตภัณฑ์ของชุมชนเป็นของตนเองหลากหลายชนิด และหนึ่งในนั้นคือ น้ำตาลโตนดผง น้ำตาลโตนดชนิดผงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำตาลโตนดแท้มีวิธีและกระบวนการผลิตจากธรรมชาติ ไม่มีสารเคมีเจือปน ไม่ใส่สารกันบูด เพิ่มความหอมหวานให้กับชา กาแฟ สลัด เบอเกอรี่ ให้รสชาติกลมกล่อมและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ การผลิตน้ำตาลโตนดผงเริ่มต้นจากการนำน้ำตาลโตนดจากงวงตาล เคี่ยวจนงวดแล้วนำไปอบและบดให้เป็นผงหรือได้จากการนำน้ำตาลโตนดก้อนมาต้มกับน้ำจนละลาย อาจจะมีการเติมน้ำตาลทรายแดง คนให้เข้ากัน นำไปอบแล้วบดให้เป็นเกล็ดเล็กๆ คุณลักษณะที่ดีของน้ำตาลโตนดผงจะต้องเป็นผงหรือเป็นเกล็ดเล็ก ๆ แห้ง ไม่จับตัวกันเป็นก้อน ต้องมีสีตามธรรมชาติของน้ำตาลโตนดผง ปราศจากกลิ่น เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน รสขม เป็นต้น (นรินทร์, 2550)

ในกระบวนการผลิตน้ำตาลโตนดผงโดยกลุ่มชุมชนนั้นจะเริ่มจากการนำกระบอกรองน้ำตาลไปผูกติดกับงวงตาลในช่วงเวลาบ่ายหรือเย็นทิ้งไว้จนถึงรุ่งเช้าจึงไปเก็บกระบอกน้ำตาลลงมา ต่อมาจะนำน้ำตาลเทลงในกระทะใบบัวโดยใช้กระชอนและผ้าขาวบางกรองเอาสิ่งปนเปื้อนออกแล้วเคี่ยวน้ำตาลประมาณ 1 ชั่วโมง ขณะเคี่ยวน้ำตาลต้องคนน้ำตาลอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่อง เพื่อไม่ให้น้ำตาลไหม้ติดก้นกระทะ หลังจากนั้นจะเป็นการเคี่ยวแห้งอีกประมาณครึ่งชั่วโมงจนถึงจุดอิ่มตัวซึ่งในขั้นตอนนี้จะไม่ใช้ความร้อนเนื่องจากความร้อนสะสมอยู่ในน้ำตาลที่เคี่ยวแล้ว ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นกระบวนการที่ทำให้น้ำตาลที่ผ่านการเคี่ยวแล้วตกผลึกกลายเป็นน้ำตาลโตนดผงโดยการยีกับกระทะ (เจือจันทร์, 2546) ในขั้นตอนการทำให้ตกผลึกโดยการยีนั้นต้องใช้แรงงานคนและเวลาค่อนข้างนานส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิต ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีจำนวนน้อยไม่ทันต่อความต้องการของตลาดและนอกจากนี้ยังส่งผลต่อความเมื่อยล้าของชาวบ้านเนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาและกำลังในการยีเพื่อให้น้ำตาลโตนดกลายเป็นผง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการสร้างและประเมินเครื่องยีน้ำตาลโตนดผง เพื่อนำมาช่วยในกระบวนการผลิตน้ำตาลโตนดผงซึ่งสามารถเพิ่มกำลังการผลิตและลดเวลาในกระบวนการผลิตลงได้ และทำให้ผลิตภัณฑ์จากน้ำตาลโตนดสามารถสร้างรายได้ให้แก่ชุมชนอย่างยั่งยืนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

หลักการออกแบบเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร

เครื่องจักรกลเกิดจากส่วนประกอบของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต่ออยู่ด้วยกัน เคลื่อนที่สัมพันธ์กัน และส่งแรงจากแหล่งต้นกำลังเพื่อเอาชนะความต้านทานต่าง ๆ การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจะเกี่ยวข้องกับรูปร่าง ขนาด และหลักการเลือกใช้วัสดุสำหรับทำชิ้นส่วนให้เหมาะสมกับการใช้งานที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน

สิ่งหนึ่งที่จะขาดเสียมิได้ก็คือศิลปะในการออกแบบ ผู้ออกแบบที่ดีควรมีศิลปะในการออกแบบด้วย ศิลปะการออกแบบอาจอธิบายได้ดังนี้คือ “ผู้ออกแบบใช้ความสามารถในการประยุกต์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ สร้างแบบที่สามารถผลิตได้โดยวิธีการทางวิศวกรรมซึ่งไม่เพียงแต่จะทำงานได้เท่านั้นแต่จะต้องผลิตได้โดยวิธีที่ประหยัดที่สุดและทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพที่สุด”

แนวทางในการออกแบบอุปกรณ์และเครื่องมือในงานอุตสาหกรรมอาหารให้ได้มาตรฐานถูกสุขลักษณะ มีหลักการดังนี้ คือ

1. ควรเลือกชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์เครื่องมือให้เหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์อาหารที่จะผลิตและเหมาะกับลักษณะของงาน เช่นไม่เป็นพิษ ไม่เป็นสนิม เป็นต้น

2. ควรออกแบบให้สามารถถอดชิ้นส่วนต่าง ๆ ออกจากกันได้เพื่อความสะดวกในการรักษาความสะอาด

3. พื้นผิวส่วนที่สัมผัสกับอาหารจะต้องเรียบไม่ขรุขระ เพื่อให้การทำความสะอาดได้ง่ายและทั่วถึง

4. ข้อต่อต่าง ๆ เช่น ข้อต่อที่ใช้ต่อท่อหรือลิ้นปิดเปิดต่าง ๆ ควรออกแบบให้สามารถ ถอดออกหรือดึงออกเป็นส่วน ๆ ได้

5. ใบพัดของเครื่องกวนซึ่งติดกับแกนภายในควรจะออกแบบให้สามารถถอดออกได้เพื่อสะดวกในการทำความสะอาด (มานพ, 2540)

การออกแบบและสร้างเครื่องยีน้ำตาลโตนดผง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ สร้าง และทดสอบ ดังนั้นในการสร้างเครื่องยีน้ำตาลโตนดผง ผู้วิจัยมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้ (Figure 1)

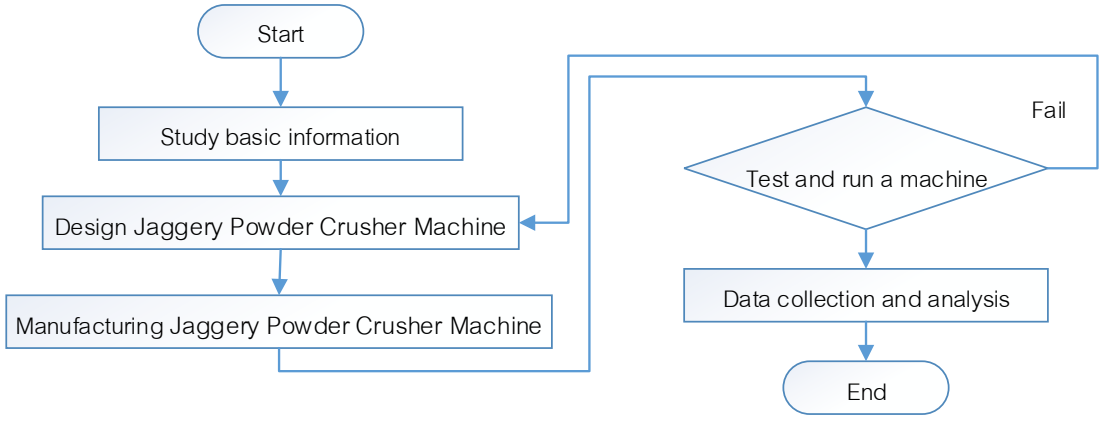


Figure 1 Research stage

1. การออกแบบชุดแขนยี ชุดแขนยีเป็นส่วนที่ใช้ในการคนไปรอบๆ กระทะโดยที่ส่วนปลายของอุปกรณ์สำหรับการยีนั้นจะทำด้วยไม้ การออกแบบจะเป็นการเลียนแบบการยีน้ำตาลโตนดโดยการใช้แรงงานคน (Figure 2) ดังนั้นการออกแบบการเคลื่อนที่ของชุดแขนยีเพื่อให้ใกล้เคียงกับการทำงานของคนนั้นจะต้องหาจุดศูนย์กลางของการหมุนของแขนยี และระยะความยาวของแขนยีที่เหมาะสม เนื่องจากส่วนโค้งของกระทะมีลักษณะไม่เป็นรูปทรงกลม ดังนั้นเมื่อแขนยีอยู่ในตำแหน่งล่างสุดของกระทะกับตำแหน่งขอบบนสุดของกระทะจะมีระยะไม่เท่ากันซึ่งมีระยะห่างประมาณ 1 เซ็นติเมตร การหาระยะดังกล่าวสามารถใช้วิธีการวัดได้ (Figure 3)



Figure 2 Jaggery powder

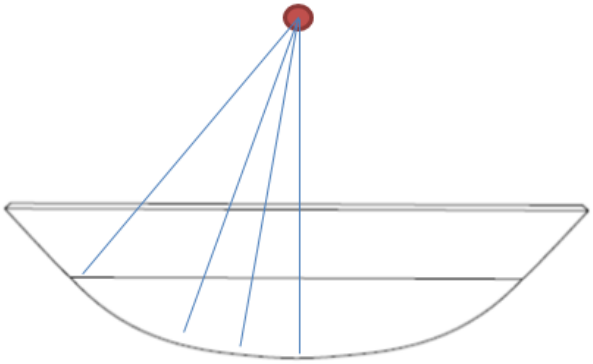


Figure 3 Measuring the length of the crusher arm

เมื่อได้ระยะจุดหมุนและความยาวของแขนยีที่เหมาะสมแล้วก็นำมาออกแบบชุดแขนยีซึ่งจะมีชุดเชื่อมโยง (link) เป็นชุดที่ทำหน้าที่ในการพาชุดแขนยีขึ้นหรือลงตามส่วนโค้งต่างๆ ของกระทะและในขณะเดียวกันก็ต้องหมุนไปรอบๆ กระทะ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการใช้ตลับลูกปืนและใส่สปริงไว้ที่ปลายของชุดแขนยี (Figure 4) เพื่อให้หัวกดของชุดแขนยีสัมผัสกับกระทะตลอดเวลาในขณะที่เคลื่อนที่ไปตามส่วนต่าง ๆ ของกระทะ (Figure 5)

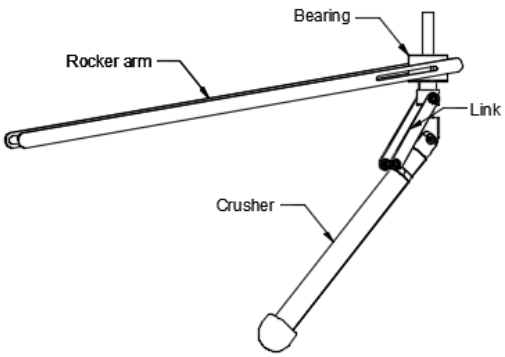


Figure 4 Model of crush arm



Figure 5 Prototype of crush arm

2. การออกแบบต้นกำลังและชุดขับเคลื่อนแขนยี ชุดต้นกำลังจะใช้มอเตอร์ AC ขนาด ½ แรงม้า ความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์เท่ากับ 1,450 รอบต่อนาที ส่งผ่านชุดคัปปลิ้งซึ่งต่ออยู่กับชุดเกลียวหนอนและเฟืองหนอน (Figure 6) ความเร็วรอบของชุดแขนยีนั้นต้องการให้หมุนลดลงเหลือ 80 รอบต่อนาที ดังนั้นการคำนวณขนาดของเฟืองและเกลียวหนอนนั้นใช้สูตรการคำนวณตามระบบเมตริก (Robert, 2009) โดยเลือกใช้เกลียวหนอนแบบปากเดียว (Single Thread) เมื่อมอเตอร์หมุน 1,450 รอบ/นาที ต้องการทดให้เหลือ 80 รอบ/นาที เท่ากับ 1,450/18 = 80.56 ดังนั้นจึงเลือกใช้เฟืองที่มีจำนวนฟันเท่ากับ 18 ฟัน (Figure 7)

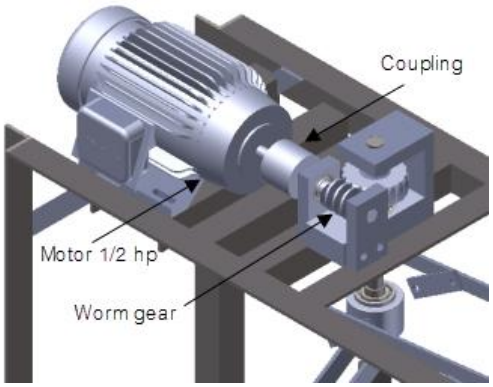


Figure 6 Worm gear transmission power



Figure 7 Worm gear

ลักษณะการทำงานของเครื่อง

การทำงานของเครื่องยีน้ำตาลโตนดผงนั้นจะใช้ผู้ปฏิบัติงาน 1 คน ทำหน้าที่ในการยกแขนโยกขึ้นหรือลงเพื่อบังคับแขนยีให้สัมผัสไปตามส่วนต่างๆ ของกระทะเหมือนกับการยีโดยใช้แรงงานคน เมื่อแขนโยกอยู่ที่ตำแหน่งสูงสุดแขนยีจะอยู่ที่ตำแหน่งส่วนบนของกระทะและเมื่อแขนโยกเลื่อนลงมาที่ตำแหน่งต่ำลงมาแขนยีจะเปลี่ยนไปที่ตำแหน่งก้นกระทะ (Figure 8) ดังนั้นเมื่อต้องการยีน้ำตาลโตนดผงก็เพียงแค่เปิดสวิตช์และเมื่อมอเตอร์หมุนก็จะส่งกำลังผ่านชุดเฟืองหนอนเพื่อหมุนแขนยีไปรอบ ๆ กระทะ และเมื่อต้องการให้แขนยีไปยังตำแหน่งใดๆ ของกระทะก็สามารถบังคับได้ด้วยการกดหรือยกแขนโยก (Figure 9)



Figure 8 The behavior of the machine

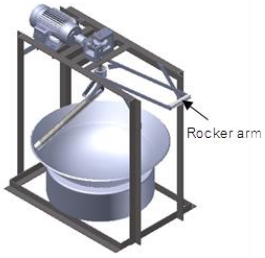


Figure 9 Jaggery powder crusher machine

วิธีการทดลอง

ในการทดลองจะทำการทดลองโดยใช้น้ำตาลโตนดปริมาณ 20 กิโลกรัมทำการเคี่ยว จนกระทั่งน้ำตาลงวดลงจากนั้นยกลงจากเตาแล้วนำมายีด้วยเครื่องยีน้ำตาลโตนด ทำการจับเวลาตั้งแต่เริ่มยีจนกระทั่งน้ำตาลโตนดกลายเป็นผง นำผงน้ำตาลที่ได้ชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบกับการยีโดยการใช้แรงงานคน และให้ผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้ประเมินคุณภาพของน้ำตาลโตนดผงว่าสามารถนำไปจำหน่ายได้หรือไม่ โดยแบบประเมินแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เลือกใช้แบบประเมินเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (rating scale) ลักษณะแบบประเมินแบ่งเป็น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านโครงสร้าง ด้านการใช้งานและด้านผลผลิต โดยเกณฑ์การประเมินจะแบ่งเป็น 4 ระดับคือ ควรปรับปรุง (0-3.50) พอใช้ (3.51-4.00) ดี (4.01-4.50) และดีมาก (4.51-5.00) ส่วนที่ 2 เลือกใช้แบบประเมินเป็นแบบข้อคำถามแบบปลายเปิด (Open ended question) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญที่ทำการประเมินเครื่องจักรแสดงความคิดเห็นในด้านโครงสร้าง ด้านการใช้งาน ด้านผลผลิตและข้อเสนอแนะอื่นๆ

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าลักษณะทางกายภาพ เช่น ขนาดของผงน้ำตาล ความร่วน และคุณภาพของน้ำตาลโตนดผง เช่น รสชาติ สี กลิ่น ขนาดของผง เป็นต้น ที่ผลิตด้วยเครื่องและผลิตด้วยแรงงานคนไม่มีความแตกต่างกันเนื่องจากการออกแบบและสร้างเครื่องเป็นการเลียนแบบการทำงานของคน (Figure 10-11)



Figure 10 Production by workers



Figure 11 Production by jaggery powder machine

นอกจากนี้การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการยีน้ำตาลโตนดผงด้วยแรงงานคนและ การยีด้วยเครื่องจักร ซึ่งพิจารณาในส่วนของ ระยะเวลาในการผลิตและปริมาณของน้ำตาลโตนดผงหลังจากการยี พบว่า ระยะเวลาที่เครื่องยีน้ำตาลโตนดเริ่มทำงานจนกระทั่งน้ำตาลโตนดกลายเป็นผงใช้เวลาเฉลี่ย 28 นาที ในขณะที่การใช้แรงงานคนในการยีจะใช้เวลาเฉลี่ย 58 นาที (Figure 12) ปริมาณน้ำตาลโตนดผงที่ได้หลังจากผ่านการยีจนเป็นผงพบว่าการใช้เครื่องยีน้ำตาลโตนดผงจะได้ปริมาณน้ำตาลโตนดผง 4 กิโลกรัม และหากใช้แรงงานงานคนในการยีจะได้ปริมาณน้ำตาลโตนดผงเฉลี่ย 3.5 กิโลกรัม (Figure 13) สาเหตุที่ทำให้ปริมาณของน้ำตาลโตนดผงที่ได้จากการยีด้วยแรงงานคนมีปริมาณน้อยกว่าการใช้เครื่องยี เนื่องจากน้ำตาลโตนดส่วนหนึ่งจับตัวกันเป็นก้อนไม่กลายเป็นผงอันเนื่องมาจากการยีที่ไม่ต่อเนื่องและการออกแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอ

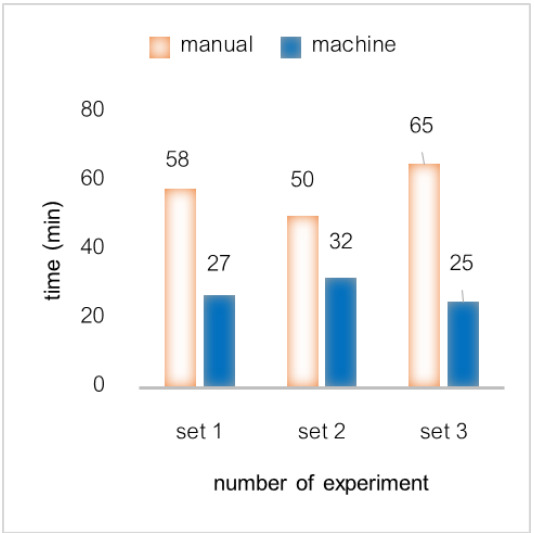


Figure 12 Time to produce jaggery powder

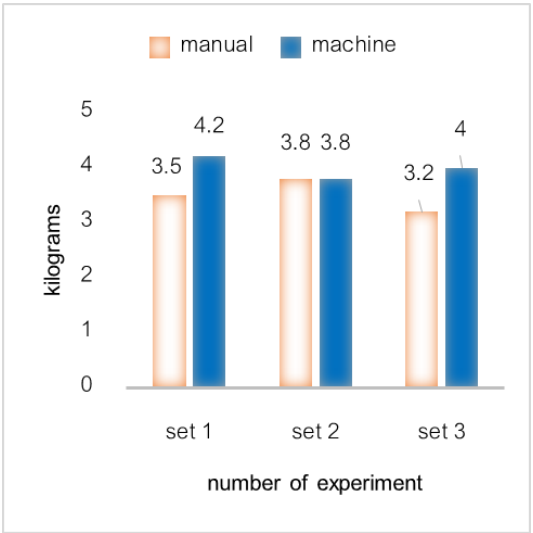


Figure 13 Quantity of jaggery powder

ในการประเมินคุณภาพของเครื่องยีน้ำตาลโตนดผง ทำการประเมิน 3 ด้าน ได้แก่ ด้านโครงสร้าง ด้านการใช้งานและด้านผลผลิต จากผลการประเมินระดับความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน พบว่าด้านโครงสร้างได้ระดับคะแนน 4.56 ซึ่งหมายความว่าเครื่องยีน้ำตาลโตนดผงมีลักษณะของโครงสร้างอยู่ในระดับดีมาก (Figure 14) ด้านการใช้งาน ได้ระดับคะแนน 4.52 อยู่ในระดับดีมาก (Figure 15) และด้านการผลิต ได้ระดับคะแนน 4.50 อยู่ในระดับดี (Figure 16)

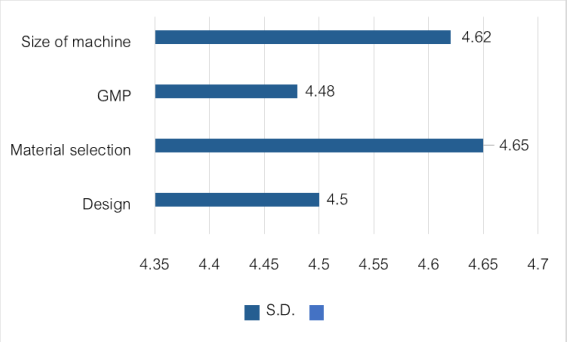


Figure 14 Satisfaction score of the structure of the machine

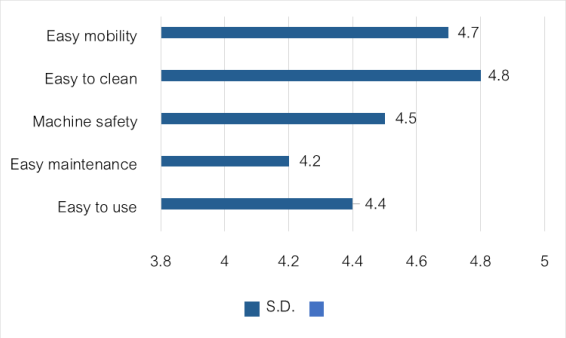


Figure 15 Satisfaction score of the practicality

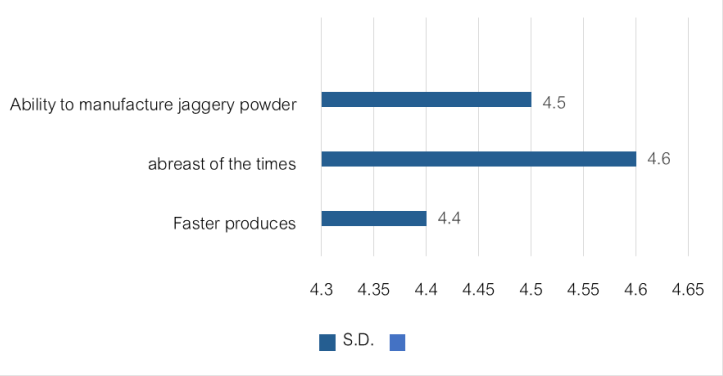


Figure 16 Satisfaction score of the production

สรุป

การสร้างและประเมินเครื่องยีน้ำตาลโตนดผงโดยใช้ความเร็วรอบในการยี 80 รอบต่อนาที พบว่า เครื่องยีน้ำตาลโตนดผง มีความสามารถในการยีน้ำตาลโตนดโดยใช้เวลาในการยีเฉลี่ย 28 นาทีต่อครั้งและได้น้ำหนักน้ำตาลโตนดผงหลังการยีด้วยเครื่องจักรเฉลี่ย 4 กิโลกรัมต่อครั้ง ส่วนการยีน้ำตาลโตนดโดยใช้แรงงานคนใช้เวลาในการยีเฉลี่ย 58 นาทีต่อครั้ง ได้น้ำหนักน้ำตาลโตนดผงหลังการยีเฉลี่ย 3.5 กิโลกรัมต่อครั้ง และเมื่อแรงงานคนปฏิบัติงานเป็นระยะเวลาหนึ่ง ผู้ปฏิบัติงานจะเกิดความเมื่อยล้า แต่ในขณะที่เครื่องยีน้ำตาลโตนดผงสามารถยีน้ำตาลโตนดได้อย่างต่อเนื่องและการปรับปรุงเครื่องในโอกาสต่อไปควรสร้างการ์ดป้องกันเศษปนเปื้อนที่จะลงไปในอาหาร

เอกสารอ้างอิง

เจือจันทร์ ด่านสืบสกุล. 2546. **ศึกษาการผลิตอาหารจากตาลโตนดของชาวบ้าน อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา**. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยทักษิณ.

ฐิติมา บุณฑริก. 2548. **การพัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ของสินค้า หนึ่งตำบล หนึ่งผลิตภัณฑ์จากตาลโตนด จังหวัดเพชรบุรี**. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.

นรินทร์ พูลเพิ่ม. 2550. **ตาลโตนด**. สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ.

ประยุทธ แก่นทรัพย์. 2551. **ภูมิปัญญาท้องถิ่นกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ตาลโตนด จังหวัดเพชรบุรี**. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

มานพ ตัณตระบัณฑิตย์. 2540. **การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 1**. พิมพ์ครั้งที่ 1 สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

Robert L. Norton 2009. **Kinematics and Dynamics of Machinery**. McGraw-Hill Higher Education.

การศึกษาแบบจำลองของผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของรถกระบะบรรทุกที่ติดตั้งถังก๊าซธรรมชาติด้วยโปรแกรม IPG CARMAKER

A simulation study of the position-changed effects on the center of gravity of natural gas pickup truck by IPG CARMAKER software package

พุฒิพร ภาคสุโพธิ์[1*] และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย[1]

Puttiporn Paksupho[1*] and Ekathai Wirojsakunchai[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถกระบะบรรทุก ที่ติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติด้วยโปรแกรม IPG CARMAKER เพื่อทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง เนื่องมาจากการติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติที่ตำแหน่งท้ายของรถกระบะบรรทุก โดยการศึกษานี้จะเทียบผลการเคลื่อนที่ของรถก่อนและหลังการติดตังถังเชื้อเพลิงธรรมชาติ ซึ่งการทดสอบจะเริ่มต้นจากไม่มีการบรรทุกจนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดตามที่กฎหมายกำหนด โดยจะจำลองตามเงื่อนไขการขับขี่ตามกฎจราจร สำหรับข้อมูลทั้งหมดที่นำมาใช้ในการจำลองนั้นจะกำหนดตามคุณสมบัติต่างๆ ของรถกระบะบรรทุก แล้วทำการเทียบผลที่ได้กับการคำนวณตามทฤษฎีการเคลื่อนที่โดย Gillespie ผลจากการจำลองพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ และผลจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงต่อการเคลื่อนที่ของรถกระบะบรรทุก ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงตามทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ อย่างไรก็ตามควรจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเทียบค่าจากการจำลองการเคลื่อนที่กับการวัดค่าจากการทดสอบจริงต่อไป

ABSTRACT

The current study aims to simulate the motion of a natural gas pick-up truck by using IPG CARMAKER software package in order to predict vehicle behaviors resulting from the effects of installation of natural gas tank, which changes of the vehicle's center of gravity. The effects of both with and without gas tank installation, vehicle behavior of the pickup truck were compared from empty loaded weight to the maximum legal vehicle weight limits in Thailand. The vehicle motion behaviors were obtained under the traffic regulations, pickup truck standards and vehicle regulations. The results were also compared to the theory of vehicle dynamics studied by Gillespie. The results have shown that the model of vehicle dynamic behaviors was able to predict the effects of center of gravity changes on pickup truck dynamic motion behavior. Nevertheless, the accuracy of this model needs to be further validated by road test results.

Key Words: IPG CARMAKER, Position-changed effects of gas tanks installation, Vehicle behavior, Under-steer gradient

* Corresponding author; e-mail address: **Puttipornmz@gmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่งสินค้าจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อความเจริญของเศรษฐกิจภายในประเทศ การขนส่งสินค้าภายในประเทศที่ใช้กันมากที่สุดคือการขนส่งสินค้าทางบกโดยใช้รถบรรทุก ทำให้จำนวนของรถบรรทุกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น และความต้องการด้านเชื้อเพลิงก็สูงตามไปด้วย รัฐบาลจึงได้มีนโยบายในการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas, NG) เป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับรถบรรทุกขนส่ง ซึ่งเชื้อเพลิงชนิดนี้มีราคาถูกและเป็นผลผลิตที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมัน เมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกับภาคขนส่งทั้งหมด จะทำให้การนำเข้าเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันลดลง ทำให้สภาพเศรษฐกิจของประเทศดีขึ้น แต่การติดตั้งระบบเพื่อใช้ก๊าซธรรมชาตินั้นจะทำให้น้ำหนักของรถเพิ่มขึ้น 310 กิโลกรัม (สามมิตรกรีนพาวเวอร์, 2013) ในขณะที่รถประเภทนี้สามารถที่จะบรรทุกน้ำหนักได้เพียง 1,000 กิโลกรัม ตามที่กฎหมายกำหนด และนอกจากน้ำหนักแล้วตำแหน่งการติดตั้งถังบรรจุก๊าซธรรมชาติโดยทั่วไปจะติดตั้งที่ด้านท้ายของรถกระบะบริเวณด้านหลังของล้อหลัง ทั้งสองปัจจัยจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วง (Center of gravity, CG) ของรถกระบะบรรทุก ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถกระบะบรรทุก

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงจากการติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติ ตามทฤษฎีการเคลื่อนที่ แรงที่กระทำกับยานพาหนะขณะเคลื่อนที่ผ่านถนนโค้งจะเป็นแรงในแนวด้านข้าง (Lateral force, F_y) ซึ่งเป็นแรงที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะโดยไม่ใช่ผลจากการควบคุมระบบบังคับเลี้ยว แรงในแนวด้านข้างจะเกิดจากมวลรวมของยานพาหนะ (Mass, m) กับความเร่งในแนวด้านข้าง (Lateral Acceleration, a_y) กระทำที่ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง โดยความเร่งในแนวด้านข้างเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วคงที่กำลังสอง (Velocity, v) กับรัศมีความโค้งของถนน (Radius of curvature, r) ตามทฤษฎีของการเคลื่อนที่จะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ พฤติกรรมหน้าดื้อในโค้ง (Under-Steering) เป็นอาการที่ยานพาหนะจะมีมุมการบิดเลี้ยวของล้อเมื่อเคลื่อนที่ในโค้งได้น้อยกว่ามุมที่ต้องใช้ในการเลี้ยวเพื่อผ่านโค้ง จึงทำให้ยานพาหนะไม่สามารถเลี้ยวผ่านโค้งที่ความเร็วเดิมได้ต้องลดความเร็วลง ซึ่งเป็นผลจากอัตราส่วนน้ำหนักที่ลงล้อหน้า (Front Weight, W_f) ต่อค่าความแข็งของยางในการเลี้ยวล้อหน้า (Front Tire Cornering Stiffness, $C_{\alpha f}$) มีค่ามากกว่า (ค่าเป็นบวก, +) อัตราส่วนน้ำหนักที่ลงล้อหลัง (Rear Weight, W_r) ต่อค่าความแข็งของยางในการเลี้ยวล้อหลัง (Rear Tire Cornering Stiffness, $C_{\alpha r}$) ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราส่วนน้ำหนักที่ลงล้อหน้า (Front Weight, W_f) ต่อค่าความแข็งของยางในการเลี้ยวล้อหน้า (Front Tire Cornering Stiffness, $C_{\alpha f}$) มีค่าน้อยกว่า (ค่าเป็นลบ, -) อัตราส่วนน้ำหนักที่ลงล้อหลัง (Rear Weight, W_r) ต่อค่าความแข็งของยางในการเลี้ยวล้อหลัง (Rear Tire Cornering Stiffness, $C_{\alpha r}$) ก็จะเกิดอาการหน้าไวในโค้ง (Over Steering) ซึ่งเป็นอาการที่ยานพาหนะจะมีมุมการบิดเลี้ยวที่ล้อมากกว่ามุมที่ต้องการใช้ในการเลี้ยวเพื่อผ่านโค้ง จึงทำให้ยานพาหนะเลี้ยวได้ไวกว่าเดิมแต่รถจะไม่เสถียร แต่ถ้าทั้งสองค่าที่กล่าวมามีค่าเท่ากันนั่นแสดงว่าเป็นการขับเข้าโค้งแบบเป็นกลาง (Neutral-Steering, ค่าเป็น 0) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในลักษณะนี้

จากการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่จากการทดสอบยานพาหนะโดยตรง จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรจำนวนมาก ทั้งเวลา แรงงาน ค่าใช้จ่าย รวมไปถึงความปลอดภัยของผู้ทำการทดสอบ (NHTSA, 2014) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของ

จุดศูนย์ถ่วง โดยใช้โปรแกรม IPG CARMAKER ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถกระบะบรรทุกที่ติดตั้งถังก๊าซเพื่อให้เชื้อเพลิงธรรมชาติ

อุปกรณ์และวิธีการ

คุณลักษณะจำเพาะของรถกระบะบรรทุกที่ใช้

รถกระบะที่นำมาใช้ในการจำลองเป็นรถยนต์ยี่ห้อหนึ่ง ซึ่งคุณลักษณะจำเพาะที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจะแสดงไว้ใน Table 1 เป็นค่าคุณสมบัติทั่วไปที่บริษัทผู้ผลิตแจ้งให้ทราบ

Table 1 Vehicle Specifications.

Dimension (Length x Width x Height)	5,260 x 1,760 x 1,795 mm
Maximum horse power	106 kW@3,400 rpm
Maximum torque	343 Nm@1,600–2,800 rpm
Wheelbase	3,085 mm
Front and Rear Tread	1,510 mm
Weight	1,460 kg
Drag Coefficient (C_d)	0.37
Minimum turning radius	6.1 m
Tire and Wheels	205/70/R15, 6JJ x15

อีกส่วนหนึ่งจะเป็นค่าที่ได้จากการวัดและทดสอบจากรถยนต์โดยตรงตามวิธีการของ IPG CARMAKER (2014) จะแสดงไว้ใน Table 2

Table 2 Measuring and Tested Data by IPG carmaker Methodology.

		X	Y	Z
Center of gravity		3.260,	0.000,	0.540 m
Wheel position	Front left	4.255,	0.755,	0.340 m
	Front right	4.255,	-0.755,	0.340 m
	Rear left	1.170,	0.755,	0.340 m
	Rear right	1.170,	-0.755,	0.340 m
Jack position	Front left	3.850,	0.700,	0.360 m
	Front right	3.850,	-0.700,	0.360 m
	Rear left	1.850,	0.700,	0.300 m

	Rear right	1.850, -0.700, 0.300 m
Gas tank position		0.500, 0.000, 0.500 m
Spring Rate	Front /Rear	13.5/24.5 kg/mm
Damper	Front and Rear	Default
Stabilizer		Default

การใส่ค่าตัวแปรและกระบวนการทำงานของโปรแกรม IPG CARMAKER

ได้แสดงกระบวนการสร้างแบบจำลองของ IPG CARMAKER ไว้ใน Figure 1 ซึ่งมีขั้นตอนหลักอยู่ 4 ขั้นตอน คือ

1. Vehicle Data Set คือ การกำหนดตัวแปรอย่างหยาบซึ่งจะใช้ข้อมูลตาม Table 1 เพื่อให้โปรแกรมสามารถสร้างค่าพื้นฐานที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของยานพาหนะที่ต้องการสร้างเป็นแบบจำลองได้ เพราะตัวแปรบางตัวอาจไม่ทราบค่าหรือมีความซับซ้อนในการหาค่า หรือต้องการเครื่องมือพิเศษในการวัดค่า ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมส่วนนี้สามารถนำมาใช้เป็นค่าพื้นฐานได้

2. Parameterizing the Vehicle Model คือ การกำหนดค่าตัวแปรอย่างละเอียดเพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง ตัวแปรในส่วนนี้จะได้จากการวัดและการทดสอบรถยนต์ตาม Table 2

3. Maneuver คือ การกำหนดรูปแบบการขับขี่ที่จะใช้ในการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ เช่น การบังคับทิศทางของพวงมาลัย การควบคุมเกียร์ ครัช เบรก คันเร่ง เป็นต้น

4. Road คือ การกำหนดรูปแบบเส้นทางที่จะใช้ในการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ เช่น รัศมีความโค้งของถนน ความกว้างของถนน มุมการเอียงรับของถนนในโค้ง มุมความโค้งของถนน ความเสียดทานของถนน เป็นต้น

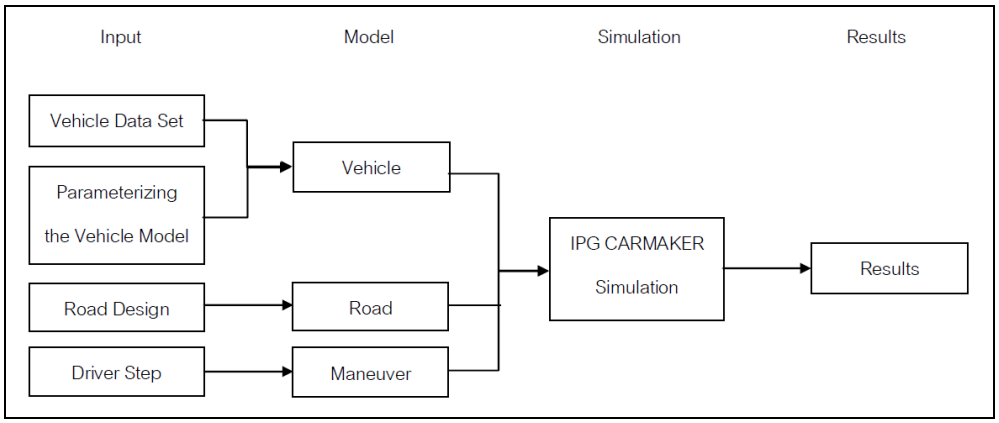


Figure 1 IPG CARMAKER Modeling Process.

การทดสอบผลจากการติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติบนรถกระบะบรรทุก ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถกระบะบรรทุก

ศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วง จากการติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติบนรถกระบะบรรทุกเทียบกับรถกระบะบรรทุกที่ไม่ติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติ โดยมีการเพิ่มน้ำหนักในการบรรทุกบนกระบะตาม Table 3 การกระจายน้ำหนักและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของการบรรทุกจะกำหนดตามวิธีของ IPG CARMAKER (2014) และตำแหน่งของถังก๊าซธรรมชาติจะกำหนดตามจุดติดตั้งจริง แล้วทำการเก็บค่าตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของรถกระบะบรรทุกทั้งประเภทที่ไม่ติดตั้งถังและติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติ

Table 3 Various Loading Conditions on Tested Vehicle

Velocity (km/h)	Load (kg)
80	0
	250
	500
	750
	1,000

การทดสอบผลของการติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติบนรถกระบะบรรทุก ที่ใช้ความเร็วคงที่ต่างๆ ส่งผลต่อพฤติกรรมหน้าดื้อโค้งหรือหน้าไวโค้งของรถกระบะบรรทุก

ศึกษาผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ในโค้ง ตามเกณฑ์ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ในโค้ง (Under-Steer Gradient) โดยรัศมีความโค้งของถนน 100 เมตร เป็นมุม 90 องศา (deg) ใช้น้ำหนักบรรทุกในการทดสอบ 1,000 กิโลกรัม แล้วทำการเก็บค่าน้ำหนักพลวัต แรงในแนวด้านข้างที่กระทำกับล้อ และมุมการลื่นไถล (Slip Angle, α) ที่เกิดขึ้นเมื่อมีความเร่งในแนวด้านข้างสูงสุด ของรถกระบะบรรทุกทั้งประเภทที่ไม่ติดตั้งถังและติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติที่ความเร็วต่างๆตาม Table 4

Table 4 Various Velocities on Tested Vehicle.

Load (kg)	Velocity (km/h)
1,000	40
	50
	60
	70
	80

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลจากการจำลองการติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติบนรถกระบะบรรทุก ต่อการเปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถกระบะบรรทุก

จากการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติบนรถกระบะบรรทุก และการเพิ่มน้ำหนักการบรรทุกที่ 0, 250, 500, 750, 1,000 กิโลกรัม ต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถกระบะบรรทุก พบว่าในแนวตามยาว Figure 2 ซ้ายมือ การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกส่งผลต่อการเปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากด้านหน้ามาด้านหลังนับตามการกำหนดของ IPG CARMAKER (2014) นอกจากนั้นรถกระบะบรรทุกทั้งประเภทที่ไม่ติดตั้งถังและติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติที่น้ำหนักการบรรทุกต่ำจะมีความแตกต่างของระยะห่างตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงมากที่สุดคือ 0.54 เมตร และลดลงตามน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงตามยาวเข้าใกล้แกนล้อหลังและความแตกต่างจะลดลงมากที่สุดเมื่อตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงอยู่บนแกนล้อหลัง และในแนวตั้งฉากตาม Figure 2 ขวามือ จะพบว่าในการเพิ่มน้ำหนักการบรรทุกส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความสูงจุดศูนย์ถ่วงของรถกระบะบรรทุกทั้งสองประเภทเป็นผลมาจากตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของการบรรทุกอยู่สูงกว่าตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของรถกระบะ เมื่อน้ำหนักการบรรทุกเพิ่มขึ้นจุดศูนย์ถ่วงรวมจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตาม แต่การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุก ส่งผลต่อความแตกต่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์ถ่วงในแนวตั้งของรถกระบะทั้งสองประเภทน้อยมาก ซึ่งความแตกต่างที่มากที่สุดคือ 0.07 เมตร นอกจากนี้การเปลี่ยนตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงยังส่งผลต่อการกระจายน้ำหนักที่ลงแกนล้อคู่หน้าและหลังของยานพาหนะ นำไปสู่ผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (Gillespie, 1992)

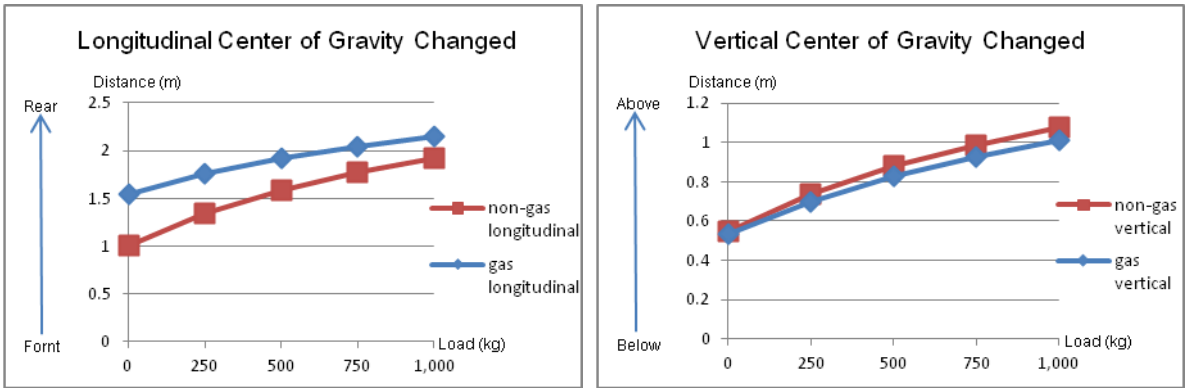


Figure 2 Changes of Center of Gravity Positions under Various Loading Conditions.

ผลจากการจำลองการติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติบนรถกระบะบรรทุก ที่ใช้ความเร็วคงที่ต่าง ๆ ส่งผลต่อพฤติกรรมหน้าดื้อโค้งหรือหน้าไวโค้งของรถกระบะบรรทุก

จากการจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติบนรถกระบะบรรทุก ที่ใช้ความเร็ว ในการทดสอบ 40, 50, 60, 70, 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ในโค้งของรถกระบะบรรทุก พบว่าการใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ภายในโค้งค่าต่างๆ แนวโน้มของความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการลดลงของค่าความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ในโค้ง ดังแสดงใน Figure 3 ซึ่งเมื่อใช้เกณฑ์ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ในโค้งเป็นตัวกำหนด (Gillespie, 1992) รถกระบะบรรทุกที่ติดตั้งถังและไม่ติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติจะมี

อาการหน้าไวในโค้ง และรถกระบะที่ติดถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติจะมีพฤติกรรมหน้าไวโค้งมากกว่ารถกระบะที่ไม่ติดตั้งถังก๊าซธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าความแตกต่างของความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ในโค้งระหว่างรถทั้ง 2 ประเภทจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นของรถกระบะบรรทุกจนถึงความเร็วที่ 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หลังจากนั้นที่ค่าความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจะมีค่าความแตกต่างกลับเพิ่มสูงขึ้นที่สุดคือ 0.22 deg/g การที่ค่าความแตกต่างของความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ในโค้งกับเพิ่มขึ้นทั้งที่ควรจะเป็นไปตามแนวโน้มคือลดลงเนื่องมาจากค่าความแข็งของยางในการเลี้ยวของล้อหลังลดลง ดูจาก Table 5 ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเกิดจากการที่ยางของรถไม่สามารถที่จะทนต่อแรงกระทำที่เพิ่มมากขึ้นได้จึงทำให้มุมการไถลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแตกต่างของความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ในโค้งกลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น

Table 5 Relations of Cornering Motion at Various Velocities.

Velocity (km/h)	Lateral Acceleration (m/s^2)	Non-Gas Installed				Gas Installed			
		Dynamics Weight		Tire Cornering Stiffness		Dynamics Weight		Tire Cornering Stiffness	
		W_f (kg)	W_r (kg)	$C_{\alpha f}$	$C_{\alpha r}$	W_f (kg)	W_r (kg)	$C_{\alpha f}$	$C_{\alpha r}$
40.00	1.30	912.93	1,535.52	366.64	392.37	837.39	1,917.09	351.41	402.40
50.00	2.00	909.10	1,538.09	570.68	551.47	833.00	1,919.02	547.88	590.35
60.00	2.77	903.70	1,542.86	781.34	671.72	826.59	1,923.05	752.22	751.14
70.00	3.86	895.37	1,555.04	1,050.25	709.87	821.37	1,926.08	1,017.42	857.40
80.00	5.01	889.31	1,558.10	1,297.10	564.54	787.07	1,966.64	1,243.45	627.78

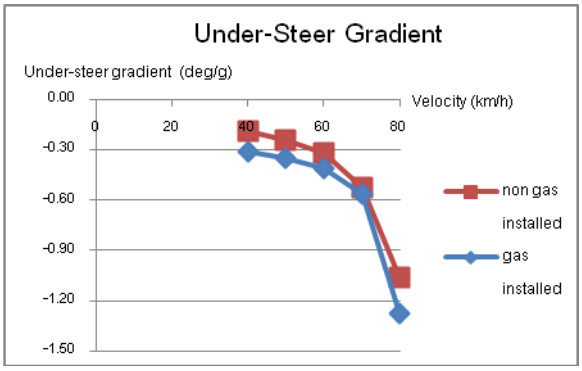


Figure 3 Impacts of With and Without Gas Tank Installation on Cornering Motion at Various Velocities.

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถกระบะบรรทุกติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติ เพื่อทำนายลักษณะพฤติกรรมการเคลื่อนที่ในโค้ง ตามเกณฑ์ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ในโค้ง โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับปัจจัยของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักพลวัตและค่าความแข็งของยางในการเลี้ยวของรถกระบะบรรทุกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านโค้ง ซึ่งได้ค่าอัตราส่วนของน้ำหนักพลวัตกับค่าความแข็งของยางในการเลี้ยวล้อหน้าน้อยกว่าล้อหลัง ในทุกค่าความเร็วที่ใช้ในการทดสอบดังนั้นค่าที่ได้จากความความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ในโค้งจึงเป็นลบ ลักษณะพฤติกรรมของรถกระบะบรรทุกติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติจึงมีลักษณะหน้าไวโค้งมากกว่ารถกระบะบรรทุกไม่ติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิง

ธรรมชาติ โดยผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถกระบะบรรทุกติดตั้งถังก๊าซเชื้อเพลิงธรรมชาติสามารถทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ได้ ไปในทิศทางเดียวกับทฤษฎีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

สำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไปในอนาคตคือการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเทียบค่าจากการจำลองการเคลื่อนที่กับการวัดค่าจากการทดสอบจริง แล้วนำแบบจำลองไปทำนายการติดตั้งถังก๊าซธรรมชาติบนรถกระบะบรรทุกส่งผลต่อการพลิกคว่ำ เพื่อหาแนวทางในการป้องกันการพลิกคว่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยและการอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ โปรแกรม IPG carmaker และรถยนต์ทดสอบ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, สำนักแผนความปลอดภัยกลุ่มพัฒนาความปลอดภัย. **การศึกษามูลค่าความเสียหายของอุบัติเหตุของกรมทางหลวง 2556**.

Allen, R.W., D.H. Klyde., T.J. Rosenthal and J.R. Hogue. 1999. Computer simulation analysis of light vehicle lateral/directional dynamic stability. **SAE Technical Paper**. 1999-01-0124.

Dingus, T. et al. 2006. The 100-Car Naturalistic Driving Study Phase II – Results of the 100-Car Field Experiment. **U.S.D.O.T. NHTSA Technical Report**. DOT HS 810 593.

Forkenbrock, G.J and W.R. Garrott. 2003. Experimental Examination of Test Maneuvers That May Induce On-Road. **SAE Technical Paper**. 2003-01-1008.

Gillespie, T.D. 1992. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. SAE, Warrendale Pa.

IPG Carmaker 2014. **Vehicle Properties**. Available Source: http://ipg.de/fr/applications/case-studies/carmaker-chez-psa, January 2015, 10

Peters, S.C and K. Iagnemma. 2009. Stability measurement of high-speed vehicles. **VSD Technical Paper**. Vol (No): 47 (6)

Shim, T and P.C. Velusamy. 2010. Improvement of vehicle roll stability by varying suspension properties. **Vehicle System Dynamics**. Vol (No): 49 (1–2)

Vilela, D and R.S. Barbosa. 2010. Analytical Models Correlation for Vehicle Dynamic Handling Properties. JBSMSE **Technical Paper**. Vol (No): 33 (4)

Whitehead, R., W. Travis., D.M. Bevly and G. Flowers. 2004. A Study of the Effect of Various Vehicle Properties on Rollover Propensity. **SAE Technical Paper**. 2004-01-2094.

การออกแบบและสร้างเครื่องยีผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร

Design and Construction of Palmyra Palm Crushing Machine for Food Processing

อรุณ สุขแก้ว[1*] วิมล บุญรอด[1] และ สุจริต สิงหพันธุ์[1]

Arun Sukkaew[1*] Wimon Boonrawd[1] and Sutjarit Singhapan[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการ ออกแบบ และสร้าง เครื่องยีผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร หาประสิทธิภาพของเครื่องยีผลตาลโตนด และหาความพึงพอใจของผู้ใช้เครื่องยีผลตาลโตนด พบว่า เครื่องออกแบบให้สามารถใช้งานได้สะดวกและใช้งานได้จริง ช่วยลดเวลาในกระบวนการยีลูกตาลโตนดและการใช้แรงงานคน ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำด้วยสแตนเลสโดยคำนึงถึงความสะอาดและปลอดภัย ความเร็วรอบของมอเตอร์ 100 รอบต่อนาที ทำให้ผิวของเนื้อตาลแยกออกจากเส้นใยตาลได้ดี ในการยีผลตาลโตนดที่น้ำหนัก 1.6 กิโลกรัมต่อครั้ง ได้เนื้อตาลเฉลี่ย 306 กรัม คิดเป็น 1.3 เท่าของแรงงานคนที่ยีเนื้อตาล ส่วนของเวลาในการยีผลตาลโตนด มีเวลาเฉลี่ย 5.6 นาที คิดเป็น 8.3 เท่าของแรงงานคนที่ยีเนื้อตาล นอกจากนี้เมื่อนำ เครื่องยีผลตาลโตนด ไปทดลองใช้ เพื่อการแปรรูปอาหารได้รับผลความพึงพอใจจากผู้ทดลองใช้ อยู่ในระดับดีมาก

ABSTRACT

The study of this research was to 1) design and construct palmyra palm crushing machine for food processing 2) to study the efficiency of the machine and 3) to study the satisfaction of the users of the machine. The results showed that the design was practical, the size was suitable, this machine can shorten the time of crushing the palm and required less man workers. The material selected for making this machine wais stainless steel and cleanness and safety was considered. Speed of motor used for driving the machine was 100 rpm. Enabling the flesh to be separated from fiber. In the experiment of crushing 1.6 kilograms of palm. 306 grams of palm flesh was obtained from one operation which was 1.3 times higher than that yielded by worker. For the time usage, the machine took 5.6 minutes or 8.3 times, which was-faster than man worker. In addition, when palmyra palm crushing machine was used for food processing, the satisfactory of the users of the machine, was scored at the highest degree.

Key Words: Palmyra palm, Crushing machine

* Corresponding author; e-mail address: **arun.s@rmutsv.ac.th**

[1] สาขาเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา 90000

[1] Faculty of industrial Education and Technology, Rajamangala University of technology Srivijaya, Songkhla 90000

คำนำ

เนื่องจากบริเวณรอบๆทะเลสาบสงขลาตั้งแต่อำเภอหัวไทรลงมาครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดในเขตจังหวัดสงขลาและพัทลุง โดยคนรุ่นเก่าเรียกบริเวณนี้ว่า เกาะสทิงพระ มีเขตพื้นที่ตั้งแต่อำเภอระโนดผ่านอำเภอสทิงพระเป็นอำเภอที่มีต้นตาลโตนดมากกว่าสามล้านต้น มากที่สุดในประเทศไทย ทำให้ชาวบ้านใช้ประโยชน์จากต้นตาลโตนด และยังเป็นพืชเศรษฐกิจของภาคใต้ (ไพรฑูรย์ ศิริรักษ์, 2554)

ชุมชนโหนดนาเล ตำบลรำแดง อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา โดย ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพประมงชายฝั่งและทำน้ำตาลโตนด เนื่อง จากประสบปัญหาจากท่าเรือน้ำลึกตั้งขวางร่องน้ำและปากทะเลสาบสงขลา ทำให้กระแสน้ำไม่ไหลเวียนและมีตะกอนทรายไปปิดกั้นร่องน้ำ สัตว์น้ำต่างๆ ที่เคยเข้ามาเพาะพันธุ์และอยู่อาศัยจึงหนีหายไป ทำให้ชาวประมงในลุ่มน้ำทะเลสาบสูบเสียอาชีพและประสบปัญหาด้านเศรษฐกิจฟองสบู่แตกในปี 2540 ส่งผลทำให้เกษตรกรต้องหารายได้เพิ่มมากขึ้นเพื่อเลี้ยงดูครอบครัว เกิดการรวมตัวของกลุ่มแม่บ้านในโครงการโหนดนาเล เพื่อแปรรูปผลิตภัณฑ์จากผลตาลโตนดเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขนมตาล สบู่ เป็นต้น

ในปัจจุบันการได้มาซึ่งเนื้อตาลยังใช้กระบวนการดั้งเดิมของกลุ่มแม่บ้านในการผลิต โดยมีกรรมวิธีการแยกเนื้อตาลกับเส้นใยตาล คือการนำผลตาลสุกมายีกับตะแกรงเพื่อให้เนื้อตาลออกจากลูกตาล นำเอาเนื้อตาลโตนดที่ได้มาห่อผ้าขาวบางเพื่อกรองแยกเส้นใยที่ยังมีอยู่ในเนื้อตาลออกให้หมด หลังจากเสร็จกระบวนการกรองเนื้อตาลแล้ว ก็จะนำเนื้อตาลที่สะอาดมาห่อผ้าขาวบางอีกครั้งเพื่อทำให้เนื้อตาลแห้ง โดยกลุ่มแม่บ้านนำไม้มาวางทับบนเนื้อตาล เพื่อคั้นน้ำออกจากเนื้อตาลแต่ต้องใช้ระยะเวลานานหรือใช้วิธีการนำผ้าขาวบางที่มีเนื้อตาลอยู่ไปแขวนทิ้งไว้เป็นเวลา 8-10 ชั่วโมง เพื่อให้เนื้อตาลแห้งเป็นการถนอมอาหาร แล้วจึงนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการ (องค์การบริหารส่วนตำบลไร่สะท้อน, 2558)

จากการสัมภาษณ์สมาชิกกลุ่มแม่บ้านโหนดนาเล พบว่าใน กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากเนื้อตาลโตนด ควรมีการออกแบบ เครื่องยีผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร เพื่อ ช่วยให้สามารถ แยกเนื้อตาลกับเส้นใยตาลออกจากกันได้อย่างรวดเร็ว สามารถนำเนื้อตาลมาใช้ในการแปรรูปได้ทันที โดยไม่ต้องเสียเวลาในการทำให้เนื้อตาลแห้ง ผู้วิจัยจึงออกแบบ เครื่องยีผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร เพื่อช่วยให้กลุ่มแม่บ้านโหนดนาเล ตำบลรำแดง อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา สามารถแปรรูปผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็ว เพิ่มกำลังการผลิตและส่งผลให้มีรายได้เสริมมากขึ้น สอดคล้องกับการดำรงชีพตามหลักเศรษฐกิจพอเพียง สนองพระราชดำริสืบไป

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ผลผลิตของพันธุ์ตาลโตนด

พันธุ์ตาลโตนดที่นิยมปลูกมี 3 พันธุ์ด้วยกันคือ ตาลพันธุ์หม้อ ตาลพันธุ์ไข่ และตาลพันธุ์ลูกผสม

1.ตาลหม้อ เป็นตาลที่มีลำต้นแข็งแรง แบ่งออกเป็น ตาลหม้อใหญ่ ผิวดำมันแทบไม่มีสีอื่นปนเลย เวลาแก่มีรอยขีดตามแนวยาวของผล และตาลหม้อเล็ก ลักษณะคล้ายตาลหม้อใหญ่ ผลมีขนาดเล็กสีดำ จะมีรอยขีดเมื่อแก่

2.ตาลไข่ ลำต้นแข็งแรง ลูกมีขนาดเล็ก สีค่อนข้างเหลืองแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน ไข่เล็กและไข่ใหญ่

3.ตาลพันธุ์ลูกผสม ลำต้นตรงใหญ่แข็งแรง ลูกค่อนข้างใหญ่เกือบเท่าตาลพันธุ์หม้อ สีดำผสมน้ำตาล โดยทั่วไปจะให้ผลเมื่ออายุ 10 ปีขึ้นไป ขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของต้น (Table 1, Figure 1)

Table 1 Detail of Palmyra palm

ชนิด	ผล/ทลาย	เมล็ด/ผล
ตาลพันธุ์หม้อใหญ่	1- 10	2 - 4
ตาลพันธุ์หม้อเล็ก	1 - 20	2 - 4
ตาลพันธุ์ไข่เล็ก	1 - 20	2 - 3
ตาลพันธุ์ไข่ใหญ่	1 - 10	2 - 3
ตาลพันธุ์ลูกผสม	1 - 20	2 - 3



(a) ตาลพันธุ์หม้อ



(b) ตาลพันธุ์ไข่



(c) ตาลพันธุ์ลูกผสม

Figure 1 Palmyra Palm

กระบวนการยีลูกตาลโตนด

กระบวนการยีลูกตาลโตนดเป็นการแยกเนื้อตาลออกจากเส้นใยตาล เพื่อให้ได้เนื้อตาลสำหรับการนำไปแปรรูปเป็นอาหาร ซึ่งกระบวนการยีลูกตาลโตนด (Figure 2) มี 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย (1) นำผลตาลโตนดสุกมาบดยีกับตะแกรงเพื่อให้เนื้อตาลหลุดออกจากลูกตาล (2) ทำการกรองเอาแต่เฉพาะเนื้อตาลออกมา โดยการใช้ผ้าขาวบางห่อเนื้อตาลแล้วหมุนผ้าเพื่อกรองและรีดให้เนื้อตาลออกมาจากผ้ามากที่สุด (3) นำผ้าขาวบางมาซ้อนกัน 2 ชั้นแล้วห่อเนื้อตาลนำไปแขวนทิ้งไว้ เป็นเวลา 8-10 ชั่วโมงเพื่อให้เนื้อตาลแห้งเป็นการถนอมอาหาร แล้วจึงสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

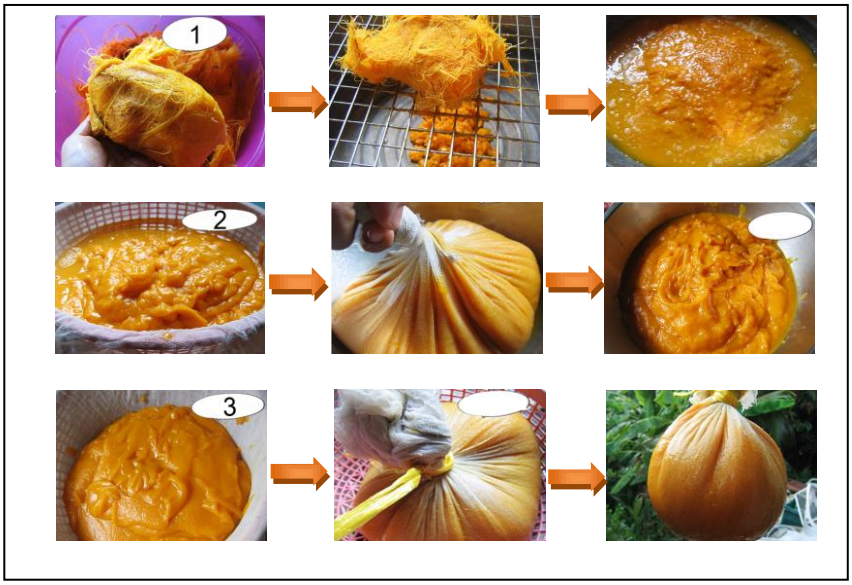


Figure 2 Palmyra Palm Crushing Procedure

โมเมนต์ของแรง

คาน (Lever) คือ เครื่องกลชนิดหนึ่งที่ใช้ดีด – งัดวัตถุให้เคลื่อนที่รอบจุดหมุน (จุด Fulcrum) มีลักษณะแข็งเป็นแท่งยาวเช่น ท่อนไม้หรือโลหะยาวคานอาจจะตรงหรือโค้งงอก็ได้

โมเมนต์ของแรง(Moment of Force) หมายถึง ผลของแรงที่กระทำต่อวัตถุเพื่อให้วัตถุหมุนไปรอบจุดหมุน ดังนั้น โมเมนต์ของแรงคือผลคูณของแรงกับระยะตั้งฉากจากแนวแรงถึงจุดหมุน (Figure 3)

ทิศทางของโมเมนต์ มี 2 ทิศทาง คือ โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาเท่ากับโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา

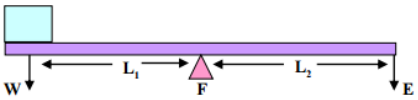


Figure 3 Moment of Force

โมเมนต์ของแรงความต้านทาน (W) = W × L1 (นิวตัน – เมตร) เป็นโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา

โมเมนต์ของแรงความพยายาม (E) = E × L2 (นิวตัน – เมตร) เป็นโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา

คาน คือ เครื่องกลชนิดหนึ่งที่มีลักษณะแข็งเป็นแท่งยาวเช่น ท่อนไม้หรือโลหะยาวคานอาจจะตรงหรือโค้งงอก็ได้มีส่วนประกอบที่สำคัญในการทำงาน 3 ส่วน ดังนี้

1) แรงความต้านทาน (W) หรือน้ำหนักของวัตถุ

2) แรงความพยายาม (E) หรือแรงที่กระทำต่อคาน

3) จุดหมุนหรือจุดฟัลครัม (F)

การออกแบบและสร้างเครื่องยีผลตาลโตนด

การดำเนินการวิจัย การออกแบบและสร้างเครื่องยีผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูป ปอาหาร ได้มีแนวคิดจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Eastman, 1949) และ (Antonio, 1992) ผสมผสานกับกระบวนการยีผลตาลของกลุ่มแม่บ้านที่ใช้ตะแกรงในการคัดแยกเนื้อตาลออกจากลูกตาล แต่ในกระบวนการดังกล่าวยังมีความล่าช้าในการผลิต ดังนั้นจึงมีแนวคิดการออกแบบ และสร้าง เครื่องยีผลตาลโตนด โดยได้แบ่งการออกแบบและสร้างส่วนประกอบของเครื่องออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนสำหรับบดยีคัดแยกเนื้อตาล

ส่วนสำหรับ บดยีคัดแยกเนื้อตาล จะทำหน้าที่บดยี เนื้อตาลแยกออกจากเส้นใย ตาล ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ คือ ตะแกรงสแตนเลสขนาด ช่อง 3 mm. x 3 mm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 cm. ประกอบกับหม้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 cm. (Figure 4) และแป้นกดลูกตาลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 cm.ยึดด้วยน็อตสแตนเลสจำนวน 24 ตัว จะออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้และสร้างจากวัสดุที่ปลอดภัยต่ออาหาร รวมทั้งอุปกรณ์จับยึด (ชัยวัฒน์, 2551)



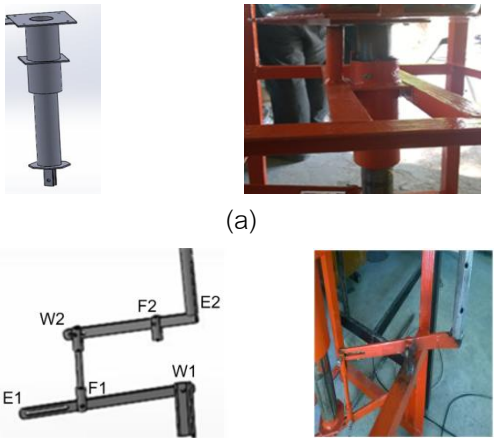
Figure 4 Screening pot container

ส่วนปรับระยะการบดยีเนื้อตาล

ส่วนปรับระยะการบดยีเนื้อตาล จะทำหน้าที่ควบคุมชุดคัดแยกเนื้อตาลให้ได้ระยะในการบดยี จะประกอบด้วย แกนยกหม้อ และคันโยก โดยมีวิธีการออกแบบและสร้าง(มานพ, 2540) แสดงดัง (Figure 5)

แกนยกหม้อประกอบด้วย แทนทรงกระบอก 2 แกน ประกอบเข้าด้วยกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 127 cm. ยาว 35 cm. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 cm. ยาว 60 cm. เพื่อประคองการสั่นของหม้อคัดแยกเนื้อตาล และควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลง (Figure 5 a)

คันโยกจะ ประกอบด้วย คานดึง 2 ชุด และด้ามจับสำหรับโยก เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงของชุดแกนยกหม้อ ซึ่งประเด็นหลักของการออกแบบคือ หาจุดหมุนที่ใช้แรงในการ ดึงคันโยกให้เหมาะสมและสามารถควบคุมได้ง่ายโดย โมเมนต์ของแรง ซึ่งความยาวของคานยกชุดที่ 1 ยาว 40 cm. โดยมีระยะจุด W1 ถึงจุดหมุน F1 เท่ากับ 26 cm. สำหรับความยาวของคานยกชุดที่ 2 ยาว 37 cm. โดยมีระยะจุด W2 ถึงจุดหมุน F2 เท่ากับ 11 cm. (Figure 5 b)



(a)

(b)

Figure 5 (a) Spindle (b) Lever bar

ส่วนต้นกำลังและควบคุมความเร็วมอเตอร์

ส่วนต้นกำลังและควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Figure 6) ใช้ AC Gear Motor 5RK90A-C เป็นระบบต้นกำลังในการหมุนแป้นกดยีลูกตาล ส่วนระบบควบคุมจะใช้สวิตช์ ON-OFF ควบคุมการทำงานของเครื่องและมีระบบควบคุมความเร็ว AC Motor ด้วยชุด Speed Control 90W ซึ่งความเร็วรอบของมอเตอร์ 100 รอบต่อนาที ทำให้ผิวของเนื้อตาลแยกออกจากเส้นใยตาลได้ดี (นิวา และ กันต์, 2555)



Figure 6 AC Motor Speed Control Set

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการออกแบบและสร้างเครื่องยีผลตาลโตนด

ผลออกแบบและสร้างเครื่องยีผลตาลโตนด เพื่อให้เกิดความสวยงามของรูปลักษณ์ภายนอกและความลงตัวต่อการใช้งานที่สะดวกสบาย รวมทั้งปกป้องระบบการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยได้ผลของการออกแบบในภาพรวมจากชิ้นงานจริง โดยมีขนาด 60 cm. x 60 cm. x 115 cm. (Figure 7)

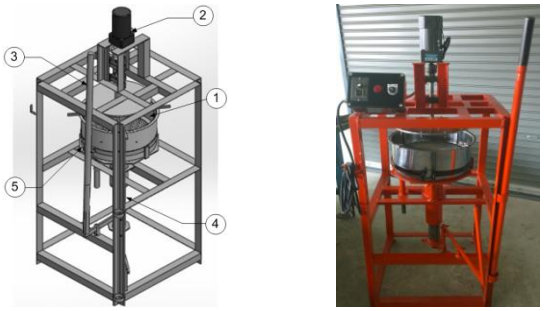


Figure 7 Palmyra Palm Crushing Machine

การทำงานของเครื่องยีผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร

1. นำผลลูกตาลโตนดที่ผ่านการปอกเปลือกแล้วใส่ลงในหม้อ บดยีคัดแยกเนื้อตาล
2. เปิด สวิตซ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์จะทำให้แป้นกดยีลูกตาลหมุน
3. ดึงคันโยกเข้าหาตัวเอง
4. ชุดคันโยกจะปรับระยะการบดยีเนื้อตาลโดยดันหม้อบดยีคัดแยกเนื้อตาลเข้าประชิดกับแป้นกดยีลูกตาลหมุนยีกับตะแกรงเพื่อให้เนื้อตาลออกจากลูกตาล
5. เมื่อเสร็จแล้วปิดสวิตซ์เครื่อง ปลดแกนล๊อกนำหม้อบดยีคัดแยกเนื้อตาลออกมาเอาเนื้อตาลออก

ผลการทดสอบประสิทธิภาพ

ตัวแปรที่ควบคุมในการทดลอง

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลตาลโตนดในการทดลองต้องมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้กระบวนการบดยีมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าขนาดของผลตาลโตนดมีความแตกต่างกันมากเกินไปจะส่งผลทำให้ไม่สามารถบดยีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ในการทดลองพบว่าน้ำหนักของผลตาลโตนดในการบดยีในแต่ละครั้งสามารถใส่ผลตาลโตนดน้ำหนักไม่เกิน 1.6 กิโลกรัม

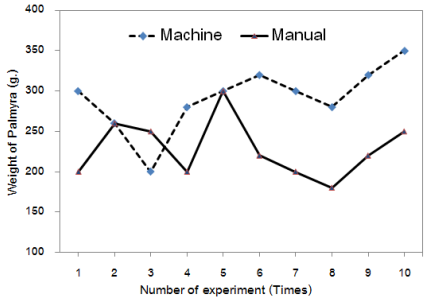


Figure 8 Measured results of palmyra weight

ผลการทดลองเปรียบเทียบการยีลูกตาลโตนดที่น้ำหนัก 1.6 กิโลกรัมด้วยแรงงานคนและการทดลองด้วยเครื่องยีผลตาลโตนด (Figure 8) พบว่า การทดลอง ยีลูกตาลโตนด ด้วยแรงงานคน ใช้เวลาเฉลี่ยในการบดขยี้ลูกตาลประมาณ 46.5 นาทีต่อครั้ง และได้น้ำหนักของเนื้อตาลหลังจากขยี้เฉลี่ยประมาณ 236 กรัมต่อครั้ง

ในส่วนของการทดลองด้วยเครื่องยีผลตาลโตนด ใช้เวลาเฉลี่ยในการบดขยี้ลูกตาลประมาณ 5.6 นาทีต่อครั้ง และได้น้ำหนักของเนื้อตาลหลังจากบดขยี้เฉลี่ยประมาณ 306 กรัมต่อครั้ง นอกจากนี้ เวลาในการบดขยี้ด้วยเครื่องเมื่อเทียบกับการใช้แรงงานคนแล้วมีสัดส่วนที่ต่างกันถึง 8.3 เท่า ซึ่งสามารถทำให้ลดระยะเวลาในการผลิตลงได้มาก

ผลการนำไปทดลองใช้

จากการทดลองใช้งานเครื่องยีผลตาลเพื่อการแปรรูปอาหาร เป็นการพัฒนากระบวนการแปรรูปเพิ่มมูลค่าให้กับกลุ่มแม่บ้าน กลุ่มแม่บ้านสามารถนำเครื่องไปใช้ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากผลตาลโตนด และเป็นการเพิ่มรายได้สู่ชุมชนส่งเสริมการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากท้องถิ่น จากการประเมิน ของกลุ่มแม่บ้านโดยการทดลองใช้งานเครื่องและผลที่ได้จากการทดลองเป็นที่พอใจมากเพราะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะเวลาที่รวดเร็วและให้ปริมาณเนื้อตาลตามที่กลุ่มแม่บ้านต้องการ (Figure 9)



Figure 9 Field operation of the machine

สรุปผลการวิจัย

การออกแบบและสร้างเครื่องยีผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร พบว่าเครื่องสามารถทำงานได้จริง มีประโยชน์ต่อการใช้งาน วัสดุและอุปกรณ์หาซื้อได้ง่ายตามแหล่งจำหน่ายทั่วไป สามารถใช้แทนแรงงานคนได้ ใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง

ด้านประสิทธิภาพในการทำงาน ของเครื่องยีผลตาลโตนด เพื่อการแปรรูปอาหารใน การนำผลตาลโตนดสุกที่มีน้ำหนักประมาณ 1.6 กิโลกรัม มาเข้าเครื่องยีผลตาลโตนดโดยใช้ความเร็วรอบในการยีผลตาลโตนดเท่ากับ 100 รอบต่อนาทีเพื่อยีผลตาลโตนด มีความสามารถในการยีผลตาลโตนดโดยใช้เวลาในการยีเฉลี่ย ประมาณ 5.6 นาทีต่อครั้งและได้น้ำหนัก ของเนื้อตาลเฉลี่ย ประมาณ 306 กรัมต่อครั้ง ผลการศึกษาวิจัย พบว่าเครื่องยีผลตาลโตนดใช้เวลาในการยีลูกตาลระหว่างเครื่องยีผลตาลกับการยีด้วยแรงงานคนมีความต่างกันเป็น 8.3 เท่าของเวลาที่ใช้ ส่วนค่าความต่างของน้ำหนักของผลตาลที่ยีได้ระหว่างเครื่องยีผลตาลกับการยีด้วยแรงงานคนมีความต่างกันเป็น 1.3 เท่าของน้ำหนัก

เอกสารอ้างอิง

ชัยวัฒน์ เผ่าสันทัดพาณิชย์. 2551. **ออกแบบพัฒนาเครื่องบดแห้งทุเรียน**. สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม, กรมวิชาการเกษตร.

นิวา กาวี และกันต์ อินทุวงศ์. 2555. การพัฒนาเครื่องนวดผลไม้เพื่อการแปรรูปอาหาร. **วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม; ว.มรม**. ปีที่ 6 ฉบับที่ 1: 171 – 175.

ไพรฑูรย์ ศิริรักษ์. 2554. **วิถีโหนด-นา-เล บนคาบสมุทรสทิงพระ**. แหล่งที่มา: http://www.gotoknow.org/posts/437465 9 กรกฎาคม 2558

มานพ ตันตระบัณฑิตย์. 2540. **การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล 1**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย – ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

องค์การบริหารส่วนตำบลไร่สะท้อน. **ข้อมูลเฉพาะเกี่ยวกับตาลโตนด**. แหล่งที่มา: http://www.raisathon.com/otop/otop_detail.php?otop_id=00000000004, 9 กรกฎาคม 2558.

N. Eastman. 1949. **Fruit-cutting and juice-expressing machine**. U.S. Patent No. 2, 479, 194. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

C. Antonio. 1992. **Machine for extracting juice from citrus fruit, particularly oranges**. U.S. Patent No. 5, 097, 757. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

ผลของแสงสว่างที่มีต่อการเปลี่ยนสีของไส้กรอกหมูในระหว่างการจัดเก็บ

Effect of illumination on color changes in cooked pork sausages during storage

ขวัญชัย ชอบสำราญ[1*] เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ[1] ทวีพล ซื่อสัตย์[2] และ นวภัทรา หนูนาค[1]

Kwanchai chopsamran[1*], Ekkapong Cheevitsopon[1], Taweepol Suesut[2] and Navaphattra Nunak[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของแสงสว่างที่มีต่อการเปลี่ยนสีของไส้กรอกหมูที่บรรจุอยู่ในถุงพลาสติกใสทำจากวัสดุโพลีเอทิลีน (LLDPE) และไนลอน (Nylon+LLDPE) ในระหว่างการจัดเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 3±1 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 สัปดาห์ เพื่อรอการจำหน่ายให้กับผู้บริโภค โดยเปรียบเทียบการจัดเก็บภายใต้สภาวะปราศจากแสงสว่างและแสงสว่างที่มีแหล่งกำเนิดแสงต่างชนิดกัน (ฟลูออเรสเซนต์และแอลอีดี) ที่อุณหภูมิแสงเท่ากับ 3000 เคลวิน และ 6500 เคลวิน โดยปรับระยะห่างของแหล่งกำเนิดแสงกับผลิตภัณฑ์ให้มีค่าความสว่างบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์เท่ากับ 200 และ 500 ลักซ์ โดยประมาณ ผลประเมินการเปลี่ยนแปลงค่าสีของไส้กรอกซึ่งได้จากวิธีการเทียบสีด้วยสายตามนุษย์ การวิเคราะห์ภาพดิจิตอล (ระบบ RGB) และการวัดสีด้วยเครื่องวัดสี (ระบบ CIE L*a*b*) ให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยแสงสว่างมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของไส้กรอกที่บรรจุอยู่ในถุง LLDPE อย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีอธิบายได้จากการลดลงของค่าสีแดง (a*) หรือการเพิ่มขึ้นของค่าความสว่าง (L*) การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการประมวลผลภาพดิจิตอลสามารถใช้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการควบคุมและประกันคุณภาพในโรงงาน ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นระบบตรวจสอบและประเมินผลแบบอัตโนมัติหรือพัฒนาเป็นอุปกรณ์พกพาต่อไปได้

ABSTRACT

The objective of this article is to study the effect of illumination on color changes in cooked pork sausage packed in transparence plastic polyethylene (LLPDE) and nylon (nylon+LLDPE) and stored at temperature of 3±1°C for 4 weeks under various light conditions before conveying them to products distribution to the consumers. The experiments were compared among the storage conditions of dark and light from different light sources (fluorescent and LED) at light temperatures of 3000 K and 6500 K. The distance between light source and sample was adjusted until the light intensity incident on a sample surface was close to 200 and 500 lux. The results obtained from the visual inspection, image analysis (RGB model) and colour measuring instrument were in agreement among them and indicated that sausages packed in LLPDE had a significant highest discoloration (P<0.05) in the light storage. Color changes were estimated by decreasing of redness (a*) or increasing of lightness (L*). Finally, it can be concluded that the digital image processing could be used as an alternative technique to quality control and assurance in the factory and this could be developed to an automatic inspection and evaluation system or a portable device.

Key Words: cooked pork sausage, light source, illumination, color, image processing

* Corresponding author; e-mail address: kwanchai.kch@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

[2]ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[2]Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

สีเป็นพารามิเตอร์แรกทางด้านคุณภาพที่ถูกประเมินโดยผู้บริโภคและเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ผู้บริโภคใช้สำหรับตัดสินใจก่อนการเลือกซื้อหรือแม้กระทั่งก่อนการบริโภค การประเมินลักษณะของสีมีหลายวิธี ได้แก่ การประเมินด้วยสายตามนุษย์ (visual inspection) การวัดด้วยเครื่องวัดสี (color measuring instrument) หรือการวิเคราะห์ภาพดิจิตอล (digital image analysis) โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพซึ่งอาจใช้โปรแกรมสำเร็จรูปหรือนักวิจัยอาจพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในงานเฉพาะด้าน สำหรับงานด้านอาหารนิยมวัดสีด้วยเครื่องวัดสีเพื่อการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ด้วยระบบ CIE-LAB (L*a*b*) อย่างไรก็ตาม พื้นที่ในการวัดสีของเครื่องวัดสีในปัจจุบันมีขนาดพื้นที่ที่จำกัด จึงไม่เหมาะสำหรับอาหารหลายชนิด แต่สามารถใช้การวิเคราะห์ภาพได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพดิจิตอลซึ่งเป็นการบันทึกภาพในแต่ละพิกเซลด้วยเซนเซอร์ที่มีความสามารถในการรับความเข้มแสงสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) โดยอยู่ในรูปแบบของโมเดล RGB และปัจจุบันได้มีนักวิจัยพัฒนากระบวนการแปลงภาพสีดิจิตอล RGB ให้อยู่ในรูปแบบสีในระบบ L*a*b* (Mery and Pedreschi, 2005; León *et al*., 2006) ซึ่งความแม่นยำที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวยังคงขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ต้องการวัดสีและความสัมพันธ์ของระบบสีที่เกิดจากประเด็นของการศึกษา ดังนั้น ในขั้นตอนก่อนการพัฒนากระบวนการประมวลผลภาพเพื่อนำไปใช้ จึงจำเป็นต้องศึกษาความสัมพันธ์ของระบบสีในเบื้องต้นเสียก่อน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของวิธีการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีไส้กรอกหมูในระหว่างการเก็บรักษา โดยคำนึงถึงระยะเวลาของการจัดเก็บผลิตภัณฑ์ ซึ่งเริ่มตั้งแต่สิ้นสุดกระบวนการผลิต จัดเก็บในห้องเก็บผลิตภัณฑ์ จนถึงจัดวางบนชั้นวางผลิตภัณฑ์เพื่อรอการจำหน่ายสู่ผู้บริโภค ซึ่งใช้ระยะเวลาทั้งสิ้นประมาณ 30 วัน โดยในระหว่างกระบวนการดังกล่าวผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องได้รับแสงสว่างจากแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาเกี่ยวกับการรักษาคุณภาพของไส้กรอกในประเด็นต่าง ๆ เช่น ชนิดของบรรจุภัณฑ์ วิธีการบรรจุ และส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (Summo *et al*., 2006; Rubio *et al*., 2008) อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาในประเด็นสภาวะของการจัดเก็บไส้กรอกในบรรจุภัณฑ์โดยเฉพาะการจัดเก็บในที่มืดและที่สว่างด้วยแหล่งกำเนิดแสงต่างชนิดกันมีอยู่ค่อนข้างจำกัด Haile *et al*. (2013) ศึกษาผลของวิธีการบรรจุและการจัดเก็บแฮมสุกในพื้นที่มีแสงและในที่มืดที่มีต่อความคงตัวของสีและการออกซิเดทีฟของลิพิดในระหว่างการจัดเก็บ 48 ชั่วโมง ซึ่งพบว่า การเก็บผลิตภัณฑ์แฮมสุกในที่มืดไม่ส่งผลให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงแต่ยังคงมีการออกซิเดชั่นของลิพิดเกิดขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ห่อหุ้มด้วยฟอยล์สามารถลดการเปลี่ยนของสีได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์โปร่งใสในกรณีที่จัดเก็บในที่มีแสงสว่าง ผลิตภัณฑ์ที่โดนแสงจะมีค่าความสว่าง (L*), เมทไมโอโกลบิน และองศาฮิว (Hue angle, H°) สูงขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a*), โครมา (Chroma) และไนโตรโซไมโอโกลบินต่ำลง Böhner *et al*. (2014) ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสง (หลอดฟลูออเรสเซนต์ (FL), หลอดเมทัลฮาไลท์ (MH), หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีการปรับสีของแสง (FL-MP) และหลอดแอลอีดี (LED)) และความเข้มข้นของออกซิเจน (0.0%, 0.5%, 1.0% และ 2.0%) ที่มีต่อการเปลี่ยนสีและการออกซิเดชั่นของไส้กรอกต้ม ซึ่งพบว่า การเปลี่ยนสีของไส้กรอกต้มเกิดจากการออกซิเดชั่นของไนโตรซิลไมโอโกลบิน (MbNO) เป็นเมทไมโอโกลบิน (MMb) ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเก็บผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงภายใต้แหล่งกำเนิดแสงสว่าง ส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดง (a*) ของไส้กรอกลดลง โดยหลอดกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น (300-550 nm) เช่น FL จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยน

สีได้อย่างมาก ส่วนหลอดที่มีความยาวคลื่นกลาง (551-800 nm) และคลื่นยาว (801-1100 nm) เช่น MH, FL-MP และ LED จะช่วยลดการเปลี่ยนสีลงได้ อย่างไรก็ตาม ยังคงขาดการศึกษาเกี่ยวกับชนิดของแหล่งกำเนิดแสง อุณหภูมิของแสง และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและผลิตภัณฑ์ซึ่งส่งผลต่อค่าความเข้มของแสงหรือความส่องสว่างบนพื้นผิวผลิตภัณฑ์ รวมทั้งยังคงขาดการศึกษาความสัมพันธ์ของระบบสีที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสีไส้กรอกภายใต้สภาวะแสงสว่างที่แตกต่างกัน

ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแสงสว่าง (ชนิดของแหล่งกำหนดแสง อุณหภูมิของแสงและความสว่างบนพื้นผิวของภัณฑ์) ที่มีต่อการเปลี่ยนสีของไส้กรอกที่บรรจุอยู่ในถุงพลาสติกใสทำด้วยวัสดุชนิดโพลีเอทิลีน (LLDPE) และไนลอน (Nylon + LLDPE) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 3±1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 สัปดาห์ โดยเป็นการศึกษาที่พิจารณาถึงสภาวะการจัดเก็บจริงในตู้เก็บสินค้า ซึ่งจำเป็นต้องให้แสงสว่างกับผลิตภัณฑ์ รวมทั้งการเปรียบเทียบวิธีการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธีการเทียบสีด้วยสายตามนุษย์ การวิเคราะห์ภาพสีดิจิตอลในรูปแบบของโมเดล RGB และการวัดสีด้วยเครื่องวัดสีในระบบสี CIE L*a*b* เพื่อนำไปพิจารณาสำหรับการพัฒนาระบบประมวลผลภาพของไส้กรอกในระหว่างการจัดเก็บแบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ เพื่อให้เกิดประโยชน์สำหรับการนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลายในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

ไส้กรอกหมูรมควันสีเหลือง-น้ำตาล (Bayern Wiener) มีส่วนผสมหลักคือ เนื้อหมู (62%) ไขมัน (13%) และส่วนผสมอื่น ๆ (25%) โดยนำเนื้อหมูชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มาตัดแต่งเลือกหาสิ่งแปลกปลอมและสิ่งไม่พึงประสงค์และนำเข้าเครื่องบดเนื้อ จากนั้นผสมเนื้อที่บดแล้วเข้ากับส่วนผสมอื่น ๆ พร้อมน้ำเย็น (อุณหภูมิ 0 – 4 องศาเซลเซียส) ในเครื่องผสมแบบสุญญากาศ ที่ความดัน 0.8 บาร์ เป็นเวลา 6 นาที จะได้เนื้อสำหรับขึ้นรูปเป็นไส้กรอก เรียกว่า “อิมัลชันแบบเนื้อหยาบ” นำอิมัลชันป้อนเข้าเครื่องขึ้นรูป เพื่ออัดเข้าไปในเคสซิ่งซึ่งทำจากไส้แกะ พร้อมกับบิดแบ่งเป็นท่อนสั้น ๆ ต่อกันเป็นเส้นยาว จากนั้นอบเส้นอิมัลชัน (ไส้กรอกดิบ) ในเครื่องอบแบบมีระบบรมควัน เพื่อทำให้ไส้กรอกสุก โดยมีอุณหภูมิใจกลางเท่ากับ 71 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และนำไปลดอุณหภูมิจนไส้กรอกมีอุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซเซียส จากนั้นในขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเป็นขั้นตอนการบรรจุ ได้นำไส้กรอกมาตัดเป็นท่อนตามที่แบ่งไว้แล้วบรรจุใส่ถุง จำนวน 7 ชิ้นต่อถุง ปิดผนึกถุงด้วยเครื่องบรรจุถุงแบบสุญญากาศ โดยถุงที่ใช้บรรจุเป็นถุงพลาสติกใส 2 ชนิด ได้แก่ 1) ถุงไนลอน ซึ่งทำจากวัสดุไนลอนและโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) และ 2) ถุงพีอี ซึ่งทำจากวัสดุโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น โดยทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ

การจัดเก็บ

จัดไส้กรอกบรรจุในตะกร้าและเก็บไว้ในห้องควบคุมภายใต้สภาวะแสงที่แตกต่างกัน โดยทำสัญลักษณ์ไว้บนถุงเพื่อแสดงชนิดของถุงที่บรรจุไส้กรอกและสภาวะแสงสำหรับการจัดเก็บ นำถุงไส้กรอกออกมาประเมินลักษณะ ของผลิตภัณฑ์สัปดาห์ละครั้ง จำนวน 4 สัปดาห์ โดยกรณีการประเมินด้วยสายตามนุษย์และการบันทึกภาพดิจิตอลซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ใช้ตัวอย่างทดสอบชุดเดิมสำหรับทั้ง 4 สัปดาห์ สำหรับการวิเคราะห์สีด้วยเครื่องวัดสี ใช้วิธีการสุ่มถุงตัวอย่างออกมาวัดตามเวลาที่กำหนดไว้ ทำการบันทึกอุณหภูมิภายในห้องจัดเก็บผลิตภัณฑ์ทุก 5 นาที ด้วยเครื่องมือวัดอุณหภูมิและตัวบันทึกข้อมูล เพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของห้อง

เก็บผลิตภัณฑ์ไม่เป็นหนึ่งในตัวแปรที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยพบว่าอุณหภูมิภายในห้องควบคุมเท่ากับ 3±1 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาของการทดลอง

การกำหนดลักษณะของแหล่งกำเนิดแสง

ติดตั้งหลอดกำเนิดแสงชนิด FL และหลอด LED เข้ากับโคม LUSO LWPF1-240/PC ซึ่งหลอดทั้ง 2 ชนิดจัดอยู่ในกลุ่มของความยาวคลื่นเดียวกัน โดยหลอด FL ที่เลือกใช้มี 2 คุณลักษณะ คือ หลอด FL ที่มีอุณหภูมิแสงเท่ากับ 3000 เคลวิน (Phillip TLD 36 W/830 warm white) และ 6500 เคลวิน (Phillip TLD 36 W/865 cool daylight) สำหรับหลอด LED ที่เลือกใช้มีอุณหภูมิแสงเท่ากับ 6500 เคลวิน (EVE LED T8 22 W, 6500 K 2000 Lm) ห้องควบคุมสภาวะแสงที่ใช้สำหรับการทดลองมีขนาด 120x140x140 เซนติเมตร แบ่งเป็น 4 ช่อง ขนาดช่องละ 30x140x140 เซนติเมตร ที่ตรงกลางแต่ละช่องแขวนโคมไฟช่องละ 1 โคม ปรับระยะการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงให้ห่างจากพื้นผิวผลิตภัณฑ์ โดยให้วัดค่าความสว่างด้วยเครื่องวัดแสง (Heavy Duty Light Meter Model 407026UM) ได้เท่ากับ 200 ลักซ์ และ 500 ลักซ์ โดยประมาณ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

การประเมินสีของไส้กรอก

การประเมินผลทางประสาทสัมผัส

ประเมินลักษณะสีของไส้กรอกด้วยวิธีการเทียบทางสายตาโดยผู้ทดสอบที่ผ่านการอบรม ผู้ทดสอบทำการเทียบสีของไส้กรอกที่บรรจุอยู่ในถุงไนลอนและถุงพีอี ซึ่งจัดเก็บภายใต้สภาวะแสงสว่างที่แตกต่างกัน โดยเทียบกับแผ่นรูปสินค้าตัวอย่างที่มีการแบ่งสีออกเป็น 7 ระดับ ในการประเมินผู้ทดสอบใช้วิธีการเทียบระดับสีของผลิตภัณฑ์ด้านที่รับแสงสว่างและระบุผลที่ได้ (ผ่านเกณฑ์/ไม่ผ่านเกณฑ์)

การวิเคราะห์ภาพดิจิตอล

จัดวางถุงผลิตภัณฑ์ลงในกล่องควบคุมแสงเพื่อควบคุมให้สภาวะแสงคงเดิมสำหรับทุกการทดลอง และบันทึกภาพถ่ายด้วยกล้องดิจิตอล (Canon PowerShot A495) ปรับตั้งแบบ Manunal ไม่ใช้แฟลช โดยกำหนดเงื่อนไขการทำงานของกล้องเหมือนกันทุกครั้ง ภายในกล่องควบคุมแสงติดแผ่นพลาสติกสีดำเพื่อลดการสะท้อนที่ผิว โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ชนิด Warm white เนื่องจากหลอดกำเนิดสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงสี แดง เขียว น้ำเงินได้ใกล้เคียงกับแสงจากดวงอาทิตย์ ทำการบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงของสีเช่นเดียวกับการประเมินผลด้วยสายตา และวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยโปรแกรม ImageJ 1.5b (National Institute of Health, USA) โดยวัดค่าสีอยู่ในระบบสี RGB เทคนิควิธีหรือขั้นตอนวิธี (Algorithm) การประมวลผลภาพดิจิตอลดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งประกอบด้วย การนำเข้าข้อมูลภาพ (Image Acquisition) จากกล้องดิจิตอล จากนั้นทำการแยกส่วนของภาพที่สนใจโดยตัดส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องออกจากภาพ (ROI) แยกองค์ประกอบของสีในรูปแบบ RGB และแปลงเป็น L*a*b* เพื่อเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของสีกับวิธีอื่น

การวัดสี

ตัดตัวอย่างไส้กรอกความยาว 2.54 เซนติเมตร เพื่อวัดสีที่ผิวของไส้กรอกด้านที่รับแสงสว่าง โดยใช้เครื่องวัดสีระบบ spectrophotometer Hunter lab (ColorFlexEZ, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA) ผลของการวัดสีที่ได้แสดงในรูป L*a*b* (L * - ความสว่าง a* - ความเป็นสีแดง/สีเขียว และ b* - ความเป็นสีเหลือง/สีน้ำเงิน) และคำนวนค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเปรียบเทียบกับค่าสีเริ่มต้นก่อนการทดลอง ΔE ($\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$) ทำการทดสอบตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง จำนวน 7 ชิ้น

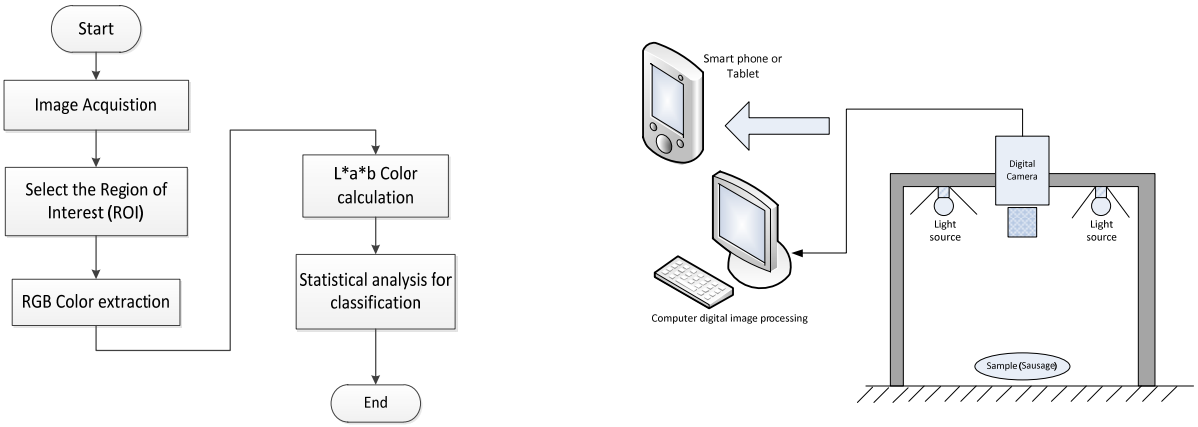


Figure 1 Digital image processing for evaluation of sausage color changes

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ประมวลผลข้อมูลทั้งหมดด้วยโปรแกรม SPSS โดยเปรียบเทียค่าเฉลี่ยด้วยวิธี One way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของแสงสว่างและชนิดของบรรจุภัณฑ์ที่มีต่อการเปลี่ยนสีของไส้กรอก

จากการศึกษาผลของแสงสว่างจากแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด ได้แก่ หลอด FL และ หลอด LED ที่อุณหภูมิแสง 3000 เคลวิน และ 6500 เคลวิน ที่มีต่อการเปลี่ยนสีของไส้กรอกที่บรรจุอยู่ในถุงพลาสติกใสทำด้วยวัสดุชนิดโพลีเอทิลีน (LLDPE) และไนลอน (Nylon + LLDPE) ในสภาวะสุญญากาศ โดยจัดเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 3±1 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 สัปดาห์ โดยไส้กรอกเริ่มต้นการเก็บมีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 47.21±0.51 และค่าสีแดง (a*) เท่ากับ 14.18±0.04 และค่าสีเหลืองเท่ากับ 26.52±0.29 ดังแสดงใน Figure 2 ผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงสีของไส้กรอกด้วยสายตาเปรียบเทียบกับมาตรฐานสีของบริษัทที่ใช้ในเชิงพาณิชย์และค่าสีของตัวอย่างที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดสีระบบ CIE ซึ่งคำนวณในรูปของการเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE) แสดงใน Table 1 สำหรับการวิเคราะห์สีจากภาพดิจิตอลในระบบ RGB แสดงใน Table 2

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในระหว่างระยะเวลาเก็บรักษา แหล่งกำเนิดแสงสว่างมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของไส้กรอกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่เก็บรักษาไว้ในสภาวะที่ไม่มีแสงสว่าง แหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าอุณหภูมิสีมากและโดยเฉพาะแหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าความสว่างมากมีแนวโน้มทำให้ไส้กรอกเกิดการเปลี่ยนแปลงสีมากขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ไส้กรอกที่บรรจุในถุง Nylon+LDPE มีการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE น้อยกว่าไส้กรอกที่บรรจุในถุง LLDPE อย่างชัดเจน ($P<0.05$) ซึ่งเป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่าชนิดของถุงบรรจุช่วยลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงได้ ตัวอย่างที่บรรจุในถุง Nylon+LLDPE และเก็บรักษาภายใต้แหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวมใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมที่เก็บรักษาไว้ในห้องมืด โดยผลที่ได้จากการประเมินค่าสีทั้ง 3 วิธีสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของสีไส้กรอกตลอดระยะเวลาการเก็บ 4 สัปดาห์ ด้วยสายตา ไม่สามารถแยกความแตกต่างของสีที่แปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะแสงสว่างที่ต่างกันได้ ในขณะที่การวิเคราะห์ภาพสีดิจิตอลและการวัดสีด้วยเครื่องวัดสีสามารถแยกความแตกต่างของสีได้ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องวัดสีให้ผลแตกต่างอย่างชัดเจนที่สุด อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากเครื่องวัดสีและการวิคราะห์

ภาพสีดิจิตอลมีค่าที่แตกต่างกัน เนื่องจากภาพสีดิจิตอลได้มาจากการถ่ายภาพผ่านบรรจุภัณฑ์ในขณะที่การวัดด้วยเครื่องวัดสีเป็นการวัดสีผิวผลิตภัณฑ์โดยตรง และทั้งสองวิธีมีกระบวนการรับภาพของเซ็นเซอร์ที่ต่างชนิดกัน

Table 1 Changes in color of sausages under various light sources and packages during storage for 4 weeks evaluated by visual inspection and color measuring instrument

Light sources	Package types	ΔE	Visual inspection
Control	LLDPE	1.76±0.40ef	Acceptance
FL 3,000K, 500Lux		7.46±0.16b	Unacceptance
FL 6,500K, 200Lux		5.72±0.18c	Unacceptance
FL 6,500K, 500Lux		8.94±0.40a	Unacceptance
LED 6,500K, 500Lux		8.95±0.74a	Unacceptance
Control	Nylon+LLDPE	0.97±0.22g	Acceptance
FL 3,000K, 500Lux		2.28±0.28de	Acceptance
FL 6,500K, 200Lux		1.27±0.19fg	Acceptance
FL 6,500K, 500Lux		1.59±0.53fg	Acceptance
LED 6,500K, 500Lux		2.92±0.32d	Acceptance

Different letters in the same column indicate that values are significantly different ($P < 0.05$). The control sample was stored in the dark room.

Table 2 Changes in color of sausages under various light sources and packaging during storage for 4 weeks evaluated by color digital image analysis in RGB and converted to “L” and “a” values

		RGB color space			CIE LAB	
Light sources	Package types	R	G	B	L[1]	a[1]
Control	LLDPE	224	181	94	75	6
FL 3,000K, 500Lux		221	203	133	81	-3
FL 6,500K, 200Lux		229	208	132	83	-3
FL 6,500K, 500Lux		226	209	145	83	-3
LED 6,500K, 500Lux		211	180	104	79	1
Control	Nylon+LLDPE	220	177	93	74	6
FL 3,000K, 500Lux		219	194	136	79	1
FL 6,500K, 200Lux		219	190	126	78	2
FL 6,500K, 500Lux		224	195	130	79	2
LED 6,500K, 500Lux		225	191	117	78	2

[1]”L” and “a” values were converted using this website (www.colormine.org/convert/rgb-to-lab)

การเปลี่ยนแปลงสีของไส้กรอกในระหว่างการเก็บรักษา

ตัวอย่างไส้กรอกบรรจุในถุง LLDPE และถุง Nylon+LLDPE เก็บรักษาไว้ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงแบบ FL ที่มีอุณหภูมิแสงเท่ากับกับ 6500 เคลวิน และมีค่าความสว่างเป็น 200 Lux เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่บรรจุในถุงชนิดเดียวกันที่เก็บรักษาไว้ในสภาวะที่ไม่มีแสง ทำการสุ่มตัวอย่างมาวัดค่าสีทุก ๆ สัปดาห์ โดยพิจารณาค่าสีที่สำคัญของไส้กรอกคือ L* และ a* (Haile *et al*., 2013 และ Böhner *et al*., 2014) ซึ่งผู้บริโภคจะพิจารณาเลือกความสดของผลิตภัณฑ์จากสีของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงค่า L* และ a* ของตัวอย่างทั้งหมดแสดงอยู่ใน Figure 2 และ Figure 3 ตามลำดับ

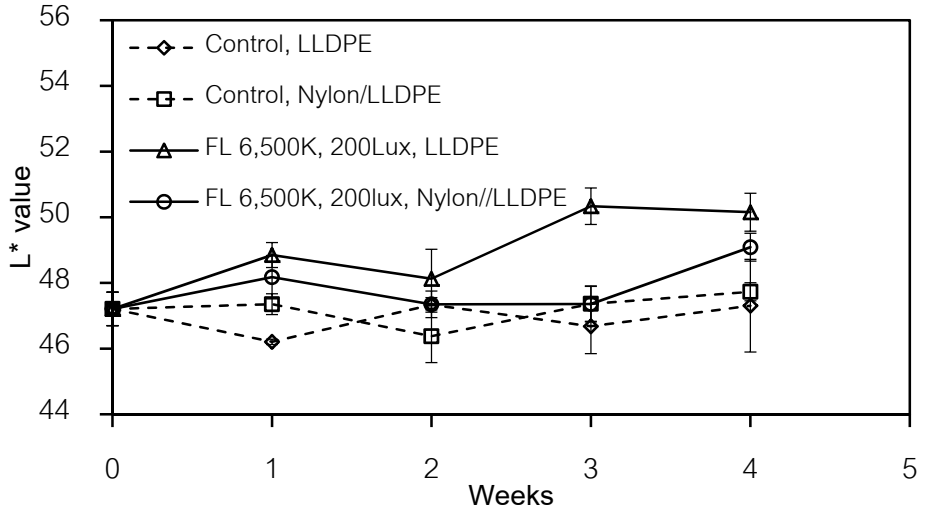


Figure 2 Changes in the L* value of sausages during storage for 4 weeks. (Control sample was storage in dark room)

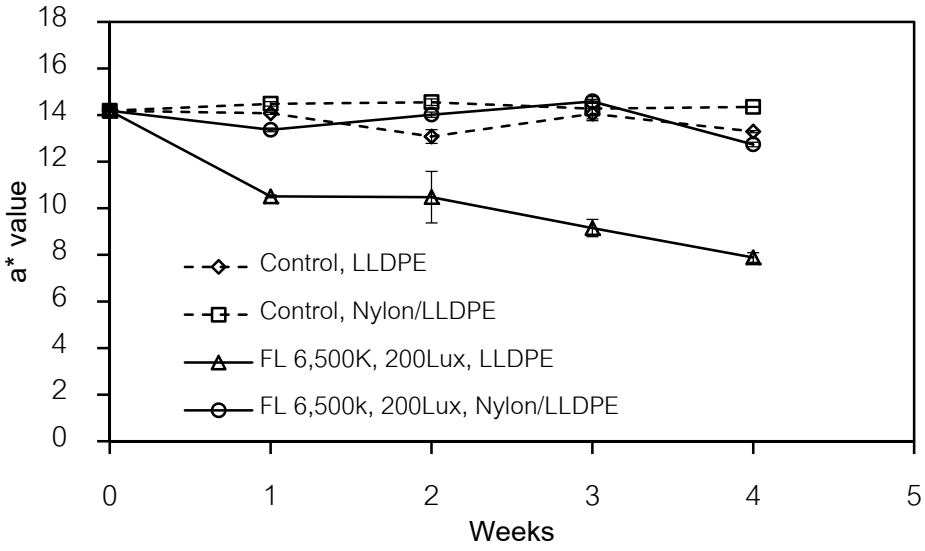


Figure 3 Changes in the a* value of sausages during storage for 4 weeks. (Control sample was storage in dark room)

Figure 2 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างไส้กรอกที่เก็บรักษาไว้ในสภาวะแหล่งกำเนิดแสงแบบ FL ที่มีอุณหภูมิสีเป็น 6,500 เคลวิน และมีค่าความสว่างเป็น 200 ลักซ์ มีแนวโน้มค่า L* เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บรักษาอย่างชัดเจน โดยในสัปดาห์ที่ 4 ตัวอย่างไส้กรอกในถุง LLDPE และในถุง Nylon+LLDPE มีค่าความสว่างเท่ากับ 50.15±0.58 และ 49.09±0.42 ตามลำดับ ตัวอย่างไส้กรอกในถุง LLDPE มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า L* มากกว่าตัวอย่างในถุง Nylon+LLDPE ภายใต้สภาวะแหล่งกำเนิดแสงแบบเดียวกัน ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมทั้งที่บรรจุในถุง LLDPE และถุง Nylon+LLDPE ในสภาวะที่ไม่มีแสง มีค่า L* ค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาของการเก็บรักษา การเพิ่มขึ้นของค่า L* ในตัวอย่างไส้กรอกที่เก็บรักษาไว้ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเพราะว่ารังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) ที่แผ่มาจากแหล่งกำเนิดแสง โดยเฉพาะแหล่งกำเนิดแสงแบบฟลูออเรสเซ้นต์ที่มีโครงสร้างเป็นหลอดแก้วสุญญากาศและมีไอปรอทอยู่ข้างใน เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านทำให้ไอปรอทปล่อยพลังงานในรูปรังสีอัตราไวโอเลต (Böhner et al., 2014) สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า a* หรือค่าความเป็นสีแดงของ

ตัวอย่างไส้กรอกบรรจุในถุง LLDPE และถุง Nylon+LLDPE แสดงอยู่ใน Figure 3 ซึ่งพบว่าไส้กรอกที่บรรจุในถุง LLDPE มีค่าความเป็นสีแดงลดลงตามระยะเวลาของการเก็บภายใต้สภาวะที่มีแหล่งกำเนิดแสงสว่าง และเป็นตัวอย่างที่มีค่า a* ลดลงมากที่สุด ในขณะที่ไส้กรอกที่บรรจุในถุง Nylon+LLDPE ภายใต้สภาวะมีแหล่ง กำเนิดแสงมีการลดลงของค่า a* น้อยกว่าอย่างชัดเจน การลดลงของค่า a* ของไส้กรอกในการทดลองนี้สอด คล้องกับงานวิจัยของ Böhner et al. (2014) ซึ่งไส้กรอกมีไมโอโกลบินและมีไนไทรต์เป็นส่วนประกอบ เมื่อได้รับความร้อนจะกลายเป็นไนโตรโซไมโอโกลบิน และถ้าไส้กรอกสัมผัสกับแสงและออกซิเจนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้สีของไส้กรอกเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะการลดลงของค่า a* (Andersen and Skibsted, 1992)

สรุป

การเก็บรักษาไส้กรอกที่สภาวะแสงสว่างที่แตกต่างกันส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของไส้กรอก ซึ่งจัดเป็นพารามิเตอร์สำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ในการตัดสินใจทางด้านคุณภาพของผู้บริโภค โดยการตรวจประเมินด้วยสายตาของมนุษย์ไม่สามารถแยกความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงของสีภายใต้สภาวะแสงสว่างที่ต่างกันได้ ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยภาพสีดิจิตอลและจากเครื่องวัดสีสามารถแยกความแตกต่างนั้นได้และให้ผลที่สอดคล้องกัน จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ภาพสีดิจิตอลสามารถใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการตรวจสอบคุณภาพไส้กรอกทางกายภาพแทนการตัดสินใจด้วยสายตามนุษย์ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์กับการพัฒนาโปรแกรมได้หลากหลายระบบปฏิบัติการ เช่น การพัฒนาเป็นแอปพลิเคชั่นบนสมาร์ทโฟน เพื่อให้ผู้ใช้งานในส่วนของการควบคุมและประกันคุณภาพในโรงงาน สามารถตรวจสอบคุณภาพด้วยความแม่นยำทั้งในและนอกสถานที่ และสามารถนำเทคนิควิธีนี้ไปใช้ในการสร้างและพัฒนาเครื่องตรวจสอบและประเมินผลแบบอัตโนมัติต่อไปได้ โดยก่อนการพัฒนาระบบประมวลผลภาพเพื่อใช้ในงานควบคุมคุณภาพควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของไส้กรอกด้วยวิธีประมวลภาพเพิ่มเติม ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงชนิดต่าง ๆ ในแต่ละสัปดาห์

เอกสารอ้างอิง

Andersen, H.J. and L.H. Skibsted. L. H. 1992. Kinetics and mechanism of thermal-oxidation and photooxidation of nitrosylmyoglobin in aqueous solution. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 40: 1741-1750

Böhner, N., Hösl, F., Rieblinger, K. and W. Danzl. 2014. Effect of retail display illumination and headspace oxygen concentration on cured boiled sausages. **Food Packaging and shelf life I** : 131-139.

Haile, D., de Smet, S., Claeys, E. and E. Vossen. 2013.Effect of light, packaging condition and dark storage durations on colour and lipid oxidative stability of cooked ham. **Journal of Food Sci Technol** 50: 239-247.

León, K. Mery, D. Pedreschi, F. and J. León. 2006. Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. **Food Research International** 39: 1084-1091.

Mery, D. and F. Pedreschi. 2005. Segmentation of colour food images using a robust algorithm. **Journal of Food Engineering** 66: 353-360.

Summo, C., Caponio, F. and A. Pasqualone. 2006. Effect of vacuum-packaging on the quality level of ripened sausages. **Meat Science** 74: 249-254.

Rosenvold, K. and E. Wiklund. 2011. Retail colour display life of chilled lamb as affected by processing conditions and storage temperature. **Meat Science**: 354-360.

อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของการย่างของเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้

Effects of grilling temperature and time of the automatic infrared grilling machine on quality of pork-skewer products

เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ[1*]

Ekkapong Cheevitsopon[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของการย่างของเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้ ได้แก่ ปริมาณความชื้น สี เนื้อสัมผัส และผลผลิต ที่อุณหภูมิการย่างเท่ากับ 520, 530 และ 540 องศาเซลเซียส และระยะเวลาของการย่างเท่ากับ 293, 352 และ 441 วินาที ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ย่างด้วยแรงงานคน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาของการย่างมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) โดยพบว่าปริมาณความชื้น ค่าความสว่าง และผลผลิตของตัวอย่างลดลงอย่างชัดเจนตามอุณหภูมิและเวลาของการย่างที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งของตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาของการย่างที่เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของแต่ละคุณภาพในตัวอย่างมีความสัมพันธ์กันทางสถิติ

ABSTRACT

The main objective of this research is to study the effects of grilling temperature and time of automatic infrared grilling machine on quality of pork-skewer products including moisture content, color, texture, and yield. The grilling temperatures were 520, 530, and 540 °C, and grilling times were 293, 352, and 441 s, respectively. All results were compared to control sample which was grilled by the manpower. The results revealed that the grilling temperature and time had a greater effect on the quality of pork products (P<0.05). The moisture content, lightness, and yield of products significantly decreased, whereas the hardness of products significantly increased with an increase in grilling temperature and time. The changes in each quality of samples were significant correlation.

Key Words: pork skewer, infrared automatic grilling machine, grilling temperature, grilling time

*Corresponding author; e-mail: **cheevitsopon@gmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

คำนำ

ในปี พ.ศ. 2557 เป็นประเทศไทยเป็นผู้ผลิตเนื้อหมูมากเป็นลำดับที่ 11 ของโลก ซึ่งมีปริมาณการผลิตมากถึง 1.026 ล้านตัน โดยเป็นการบริโภคภายในประเทศเป็น 0.967 ล้านตัน (ประมาณ 95 % ของการผลิตทั้งหมด) และส่งออกไปยังต่างประเทศประมาณ 5 % ของการผลิตทั้งหมด (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) เนื้อหมูสามารถนำมาประกอบอาหารได้หลากหลายประเภท และเป็นหนึ่งในอาหารเช้าที่คนไทยนิยมรับประทานคือ หมูปิ้ง หรือหมูย่าง โดยการนำเนื้อหมูไปหมักกับส่วนผสมและเครื่องปรุงรสต่าง ๆ หลังจากนั้นนำเนื้อหมูมาเสียบไม้และย่าง ลักษณะของการย่างเป็นการวางผลิตภัณฑ์ไว้เหนือไฟ เพื่อให้สุกระอุทั่วกัน (ราชบัณฑิตยสถาน, 2542) โดยทั่วไปการแปรรูปอาหารเนื้อสัตว์ด้วยการย่างมักใช้แหล่งความร้อนจากไฟฟ้า หรือจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ถ่านไม้ หรือก๊าซ หน่วยงานด้านการเกษตรของประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Department of Agriculture, 2011) ได้แนะนำค่าอุณหภูมิความร้อนภายในตรงกลางของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปประเภทเนื้อสัตว์ควรเป็นอย่างน้อย 62.8 องศาเซลเซียส และเป็นเวลาอย่างน้อย 3 นาที สำหรับเนื้อสด หรือเป็น 71.1 องศาเซลเซียส สำหรับเนื้อบด

การย่างเป็นวิธีการที่ทำให้อาหารมีความเสี่ยงสำหรับผู้บริโภคเนื่องจากเกิดสารก่อมะเร็ง (Carcinogens) ในกระบวนการย่าง (Övervik and Gustavsson, 1995; Viegas *et al*., 2012) โดยเฉพาะการย่างเนื้อสัตว์ด้วยอุณหภูมิสูง สารเฮทเทอโรไซคลิก เอมีน (Heterocyclic amines, HCAs) เกิดขึ้นจากการให้ความร้อนโปรตีนในเนื้อสัตว์จนไหม้หรือเกรียม รวมทั้งสารโพลีไซคลิก อะโรเมติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) เกิดขึ้นจากการสันดาปไม่สมบูรณ์ของไขมัน ซึ่งน้ำมันจากเนื้อสัตว์หยดลงบนแหล่งกำเนิดความร้อน แล้วเกิดการเผาไหม้เป็นควันและเขม่า (Viegas *et al*., 2012) ซึ่งลอยขึ้นมาติดกับผิวของผลิตภัณฑ์ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการย่างที่ไม่เหมาะสมทำให้อาหารมีความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค โดยเฉพาะอย่างยิ่งการย่างเนื้อสัตว์ที่ใช้แหล่งความร้อนจากการเผาไหม้ของถ่าน ซึ่งมีสาร PAHs ในควันจากการเผาไหม้ของถ่านไม้ในปริมาณที่สูงมาก (Övervik and Gustavsson, 1995) แต่สำหรับการย่างด้วยคลื่นอินฟราเรดพบว่ามีการหยดของไขมันและน้ำจากผลิตภัณฑ์น้อยกว่าการย่างด้วยวิธีทั่วไป และมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานดีกว่า (Shilton *et al*., 2002; Braeckman *et al*. 2009) นอกจากนี้ยังพบว่าในระหว่างการให้ความร้อน เนื้อสัตว์มีการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพต่าง ๆ ได้แก่ มวลของเนื้อสัตว์ลดลงเนื่องจากการระเหยของน้ำ หรือการหยดของน้ำและน้ำมัน ขนาดของเนื้อสัตว์ลดลง และความแข็งของเนื้อสัตว์เพิ่มขึ้นเพราะโปรตีนเสียสภาพจากความร้อน (Protein denaturation) รวมทั้งพบว่า กลิ่น รสชาติ และสีของเนื้อสัตว์เปลี่ยนแปลงด้วย (Erdogdu *et al*. 2005; Braeckman *et al*. 2009; เอกพงษ์ และคณะ, 2556)

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบและสร้างเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารเสียบไม้ ซึ่งให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน มีลักษณะการย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสียบไม้ในแนวดิ่ง และช่วยแก้ปัญหาการหยดของน้ำมันลงบนแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของการย่างของเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เนื้อหมูเสียบไม้ ได้แก่ ปริมาณความชื้น สี เนื้อสัมผัส และผลผลิต

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเนื้อหมู

เนื้อหมูสันนอกหมักรวมกับกระเทียม พริกไทย รากผักชี และเครื่องปรุงรสต่าง ๆ เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส นำเนื้อหมูเสียบกับไม้เสียบแบบด้ามธง ความยาวของไม้เสียบเป็น 150 มิลลิเมตร ตัวอย่างเนื้อหมูเสียบไม้มีลักษณะคล้ายทรงกระบอก (Figure 1) เส้นผ่านศูนย์กลาง 24±2 มิลลิเมตร ยาว 92±2 มิลลิมิเมตร และมีมวล 42±0.52 กรัม ตัวอย่างแช่แข็งเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนทดลองย่างให้วางตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งตัวอย่างมีอุณหภูมิเป็น -5 องศาเซลเซียส

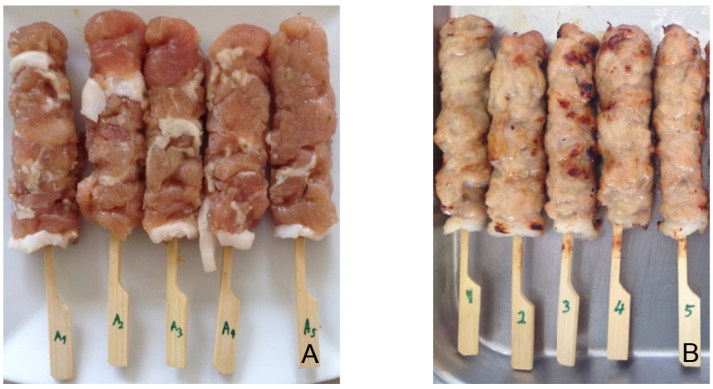


Figure 1 The samples before grilling (A), and samples after grilling (B)

การเตรียมเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรด

เครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรด (Figure 2 และ Figure 3, เลขที่คำขอสิทธิบัตร 1401003748 ของกรมทรัพย์สินทางปัญญา) มีส่วนประกอบหลักดังนี้ 1) ชุดส่งกำลังและลำเลียง 2) ชุดกลไกจับด้ามไม้ 3) ชุดความร้อนแบบอินฟราเรด และ 4) ชุดควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของการย่าง

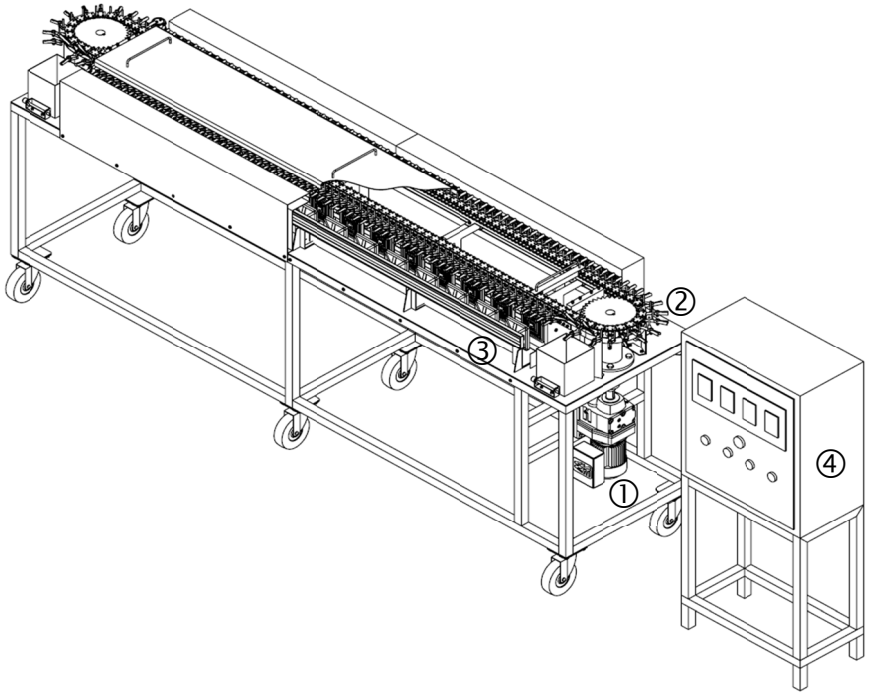


Figure 2 The automatic infrared grilling machine

การทำงานเริ่มต้นจากป้อนตัวอย่างเข้ากับชุดกลไกจับด้ามไม้ ตัวอย่างอยู่ในแนวดิ่งและเคลื่อนที่ผ่านชุดความร้อนแบบอินฟราเรดทั้งสองด้าน (ชุดความร้อนยาวด้านละ 2.4 เมตร) และเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณของการเอาไม้ออก ปากของกลไกจับด้ามไม้เปิดออก ตัวอย่างหล่นลงบนภาชนะรองรับ ทดลองย่างตัวอย่างครั้งละ 10 ไม้ ด้วยเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดที่อุณหภูมิผิวแผ่นอินฟราเรด 520, 530 และ 540 องศาเซลเซียส และที่อัตราเร็วชุดลำเลียง 1, 1.27 และ 1.54 เซนติเมตรต่อวินาที (อัตราการย่าง 1,007 1,390 และ 1,683 ไม้ต่อชั่วโมง) ที่อัตราเร็วชุดลำเลียงเหล่านั้น ใช้เวลาในการย่าง 441, 352 และ 293 วินาที ตามลำดับ ใช้แผ่นอินฟราเรดแบบมีเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเคอยู่บนผิวของแผ่นอินฟราเรด และควบคุมอุณหภูมิแบบ PID มีค่าความผิดพลาด ±2 องศาเซลเซียส จากการทดลองเบื้องต้นในทุกสภาวะหลังการย่างตัวอย่างมีอุณหภูมิภายในตรงกลางมากกว่า 72 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถรับประทานได้ ทดสอบคุณภาพตัวอย่างและเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยใช้คนทำการย่างตัวอย่างควบคุมด้วยเครื่องย่างยี่ห้อ Nanotech รุ่น KF-03 ที่ใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว และแผ่รังสีความร้อนแบบอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 500-520 องศาเซลเซียส และเวลาในการย่าง 490-500 วินาที (อัตราการย่าง 400 ไม้ต่อชั่วโมงต่อคน) ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้ผลิตหมูย่างเสียบไม้เพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ และผลิตภัณฑ์มีคุณภาพได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค ได้แก่ รสชาติ สี และเนื้อสัมผัส

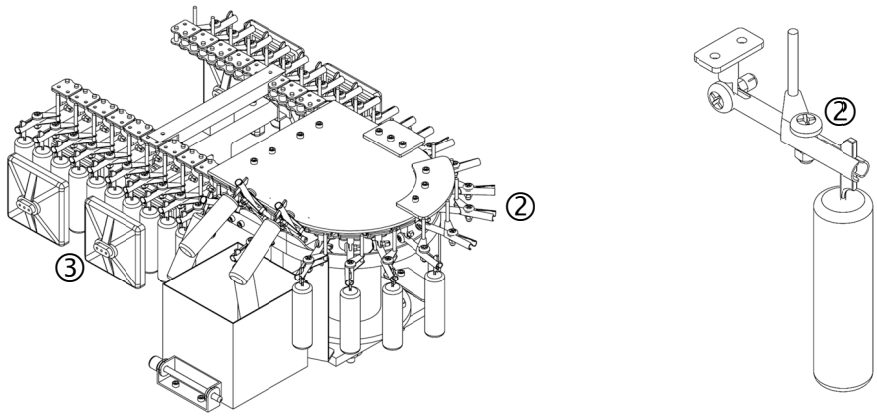


Figure 3 The feeding of samples and the gripper

การทดสอบคุณภาพตัวอย่างหลังการย่าง

ปริมาณความชื้น

ทดสอบหาปริมาณความชื้นของตัวอย่างโดยใช้ตัวอย่างที่มีมวล 2 กรัม อบแห้งด้วยตู้อบแห้งแบบลมร้อน (Model UFB400, Memmert GmbH + Co. KG, Germany) ที่อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง (AOAC, 2006) และคำนวณปริมาณความชื้นในหน่วยเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (Wet basis, w.b.)

สี

วัดสีที่ผิวภายนอกของตัวอย่างบริเวณตรงกลางด้วยเครื่องวัดสี (Model ColorFlex EZ, Hunter Associates Laboratory, Inc., US) ในระบบ CIE และแสดงผลค่าสีเป็นค่า L^*, a^* และ b^* (Braeckman *et al.*, 2009)

เนื้อสัมผัส

ตัดตัวอย่างขนาด 15×15×15 มิลลิเมตร จากบริเวณตรงกลางของตัวอย่าง ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกด (Model TA.XT.Plus, Stable Micro System Ltd., UK) และวิเคราะห์โปรไฟล์เนื้อสัมผัส (Texture Profile

Analysis) โดยใช้หัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่อัตราเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ระยะ 50 % ของความเครียด (Strain) ดัดแปลงจากวิธีของ Braeckman *et al*. (2009)

ผลผลิต (Yield)

ผลผลิตของตัวอย่างคำนวณจากอัตราส่วนของมวลของตัวอย่างหลังการย่างต่อมวลของตัวอย่างก่อนการย่าง และแสดงค่าผลผลิตในหน่วยเปอร์เซ็นต์

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบคุณภาพตัวอย่างทำซ้ำ 10 ครั้ง โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 10 ไม้ จากการทดลองครั้งเดียวของแต่ละสภาวะการย่าง ผลทดสอบแสดงเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (One way analysis of variance) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % แสดงการเปลี่ยนแปลงคุณภาพตัวอย่างด้วยวิธีพื้นผิว 3 มิติ (3D Surface plot) แบบความสัมพันธ์อันดับสอง (Quadratic) และวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพตัวอย่างด้วยวิธีเพียร์สัน (Pearson)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริมาณความชื้น

ตัวอย่างเนื้อหมูเสียบไม้ก่อนการย่างมีปริมาณความชื้นเริ่มต้น 64.72±0.48 % ฐานเปียก ทดลองย่างตัวอย่างด้วยเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดที่อุณหภูมิของการย่างเท่ากับ 520, 530 และ 540 องศาเซลเซียส และเวลาของการย่างเท่ากับ 293, 352 และ 441 วินาที ตามลำดับ หลังการย่างพบว่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างลดลง (Table 1 และ Figure 4) เนื่องจากการระเหยของน้ำจากความร้อน และการหยดของน้ำออกจากตัวอย่าง เพราะเกิดการหดตัวของตัวอย่างจากการเสียสภาพของโปรตีน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Shilton et al. (2002) และ Braeckman *et al*. (2009) และเอกพงษ์ และคณะ (2556) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) ตามอุณหภูมิและเวลาของการย่างที่เพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณความชื้นสุดท้ายอยู่ในระหว่าง 49.76±2.73 ถึง 61.01±0.93 % ฐานเปียก ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาของการย่างที่ใช้

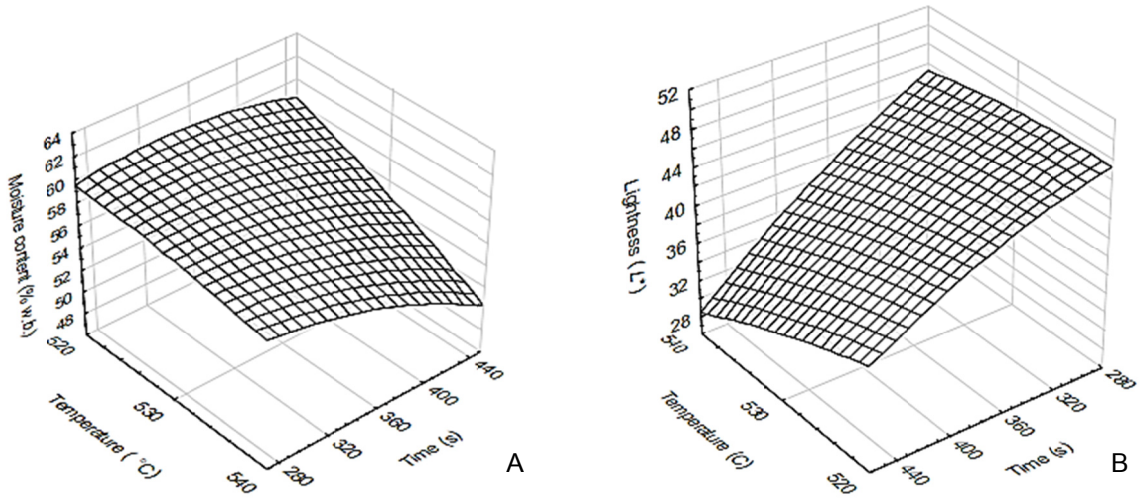


Figure 4 The moisture content (A) and lightness (B) of samples at various grilled conditions

สี

จากการสังเกตพบว่าสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่างด้วยเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองใน Table 1 และ Figure 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาของการย่างเพิ่มขึ้น ค่าความสว่างของตัวอย่างลดลงอย่างชัดเจน (P<0.05) การลดลงของค่าความสว่างเป็นเพราะว่าเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) ร่วมกับการเสียสภาพของไมโอโกลบิน (Myoglobin denaturation) บนผิวของตัวอย่างในระหว่างการย่าง โดยมีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และพบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นน้อยจะมีค่าความสว่างที่ผิวของตัวอย่างน้อยด้วย ซึ่งความสัมพันธ์นี้ตรงกับงานวิจัยของ Sánchez del Pulgar *et al*. (2012)

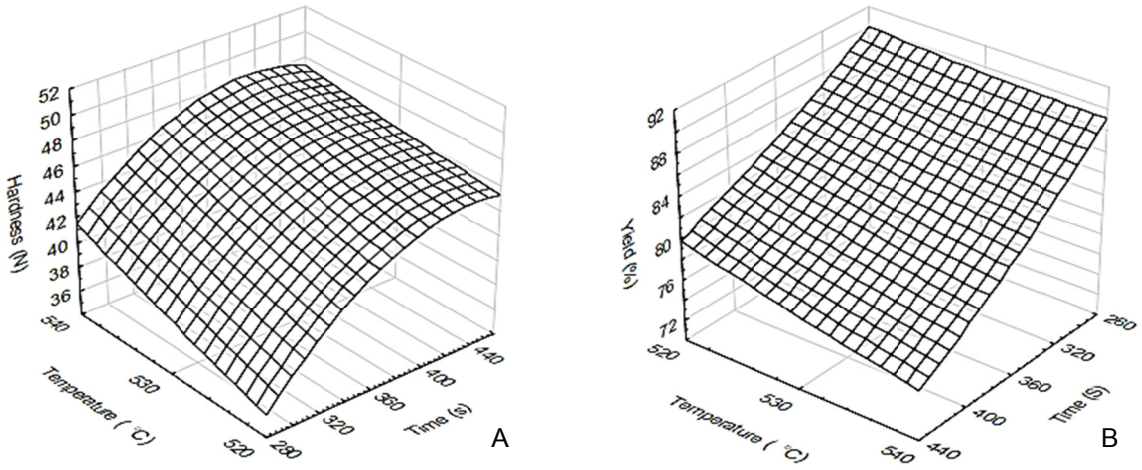


Figure 5 The hardness (A) and yield (B) of samples at various grilled conditions

เนื้อสัมผัส

คุณภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทเนื้อสัตว์ที่ส่งผลต่อความยอมรับของผู้บริโภค คือ เนื้อสัมผัส Table 1 และ Figure 5 แสดงค่าเนื้อสัมผัสของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองทั้งหมด ตัวอย่างก่อนการย่างมีค่าความแข็งเท่ากับ 6.30±1.43 นิวตัน การทดลองย่างตัวอย่างที่สภาวะต่าง ๆ ให้ค่าความแข็งของตัวอย่างแตกต่างกัน โดยการย่างที่อุณหภูมิมากขึ้นและเวลาของการย่างนานขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่าความแข็งมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งนี้เป็นเพราะโปรตีนของเส้นใยกล้ามเนื้อได้รับความร้อนและเสียสภาพโปรตีนจับตัวเป็นก้อนและแข็งตัว (Protein hardening) (เอกพงษ์ และคณะ, 2556) รวมทั้งเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นในตัวอย่างลดลงด้วย

ผลผลิต

ผลผลิตของตัวอย่างที่ได้จากการทดลองย่างด้วยอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ แสดงอยู่ใน Table 1 และ Figure 5 ค่าผลผลิตที่ได้จากตัวอย่างควบคุมเท่ากับ 82.35±4.59 % และค่าผลผลิตที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดอยู่ระหว่าง 74.89±2.35 ถึง 89.07±1.20 % ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาของการย่างมีอิทธิพลต่อค่าผลผลิตของตัวอย่างชัดเจน (P<0.05) ค่าผลผลิตลดลงตามอุณหภูมิและเวลาของการย่างที่เพิ่มขึ้น การลดลงของค่าผลผลิตเป็นเพราะการสูญเสียน้ำและน้ำมันระหว่างการย่าง ทั้งที่อยู่ในรูปแบบการระเหยของน้ำ และการหยดของน้ำและน้ำมันตามที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพต่าง ๆ ของตัวอย่าง

Table 2 แสดงปริมาณความชื้น ค่าความสว่าง และค่าผลผลิตของตัวอย่างมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันที่ระดับนัยสำคัญ $P<0.01$ ในขณะที่ค่าความแข็งมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกับปริมาณความชื้น ค่าความสว่าง และค่าผลผลิตของตัวอย่าง การย่างตัวอย่างด้วยอุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพต่าง ๆ ในตัวอย่างมีความสัมพันธ์กันทางสถิติ

Table 1 The quality of samples at various grilled condition

No.	Temp (°C)	Time (s)	Moisture (% w.b.)	Lightness (*L**)	Hardness (N)	Yield (%)
Control	-	-	57.81±1.52bc	43.99±1.03bc	40.08±3.79bcd	82.35±4.59c
1	520	293	61.01±0.93a	48.01±1.77a	37.88±2.02d	89.07±1.20a
2	520	352	59.54±1.37a	43.12±3.06bc	42.06±4.11abcd	84.72±0.28abc
3	520	441	58.29±1.06bc	38.99±0.81d	45.83±3.85abc	79.84±0.51cd
4	530	293	58.00±0.92bc	45.77±1.02ab	39.61±1.33cd	88.02±1.86ab
5	530	352	57.63±1.16bc	42.46±1.98c	45.03±8.44abc	83.43±1.73bc
6	530	441	56.74±0.48c	35.88±1.95e	46.23±4.82abc	76.97±1.77de
7	540	293	57.13±0.87bc	43.57±0.84bc	42.45±7.36abcd	87.85±0.22ab
8	540	352	56.82±1.60c	41.23±0.78cd	47.07±4.85ab	81.86±2.93c
9	540	441	49.76±2.73d	29.77±0.59f	47.81±4.21a	74.89±2.35e

Different letters in the same column indicated that values are significantly different ($P<0.05$)

Table 2 The correlation coefficients between each quality of samples

Quality	Moisture	Lightness	Hardness	Yield
Moisture	1	0.7933**	-0.4698*	0.6556**
Lightness	0.7933**	1	-0.5196**	0.8960**
Hardness	-0.4698*	-0.5196**	1	-0.6550**
Yield	0.6556**	0.8960**	-0.6550**	1

** Correlation is significant at the $P<0.01$; * Correlation is significant at the $P<0.05$

สรุป

การทดลองย่างเนื้อหมูเสียบไม้ด้วยเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 520, 530 และ 540 องศาเซลเซียส และเวลาของการย่าง 293, 352 และ 441 วินาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาของการย่างมีอิทธิพลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ปริมาณความชื้น ค่าความสว่าง และค่าผลผลิตของตัวอย่างลดลงอย่างชัดเจนตามอุณหภูมิและเวลาของการย่างที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งของตัวอย่างเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นมีความสัมพันธ์ทิศทางเดียวกับค่าความสว่างและผลผลิตของตัวอย่าง แต่มีความสัมพันธ์ทิศทางตรงข้ามกับค่าความแข็งของตัวอย่าง ผลลัพธ์ของการย่างตัวอย่างด้วยเครื่องย่างอัตโนมัติแบบอินฟราเรดให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีใกล้เคียงกับการย่างด้วยคน คือการย่างที่อุณหภูมิ 540 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 293 วินาที (อัตราเร็วชุดลำเลียง 1.54 เซนติเมตรต่อวินาที) อย่างไรก็ตามคุณภาพของผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องมีการทดสอบทางประสาทสัมผัสเพิ่มเติมเพื่อแสดงถึงความยอมรับของผู้บริโภค

กิตติกรรมประกาศ

การทดลองนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 และขอบคุณผู้ช่วยทดลอง นายพนธกร ศิริปริญญานันท์ นางสาวปีย์ชนา สุโกศล และนายรัฐโชติ วชิรปัญญานันท์

เอกสารอ้างอิง

ราชบัณฑิตยสถาน. 2542. **พจนานุกรม**. แหล่งที่มา: http://rirs3.royin.go.th, 1 พฤศจิกายน 2558.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2558. **ปริมาณการผลิตเนื้อหมูและการบริโภคภายในประเทศ**. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/download/bapp/2558/13.pptx, 1 พฤศจิกายน 2558.

เอกพงษ์ ชีวิตโสภณ, เกียรติศักดิ์ รุ่นพระแสง และ ภูริวัจน์ อธิโชคธนพันธ์. 2556. อิทธิพลของระยะห่างและเวลาของการย่างต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อหมู, น. 595–600. *ใน* **รายงานการประชุมทางวิชาการของสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 15**. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

Association of Official Analytical Chemists. 2006. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 18th ed. Arlington, VA.

Braeckman, L., F. Ronsse, P.C. Hidalgo and J. Pieters. 2009. Influence of combined IR-grilling and hot air cooking conditions on moisture and fat content, texture and colour attributes of meat patties. **Journal of Food Engineering** 93: 437–443.

Erdogdu, F., S.E. Zorrilla and R.P. Singh. 2005. Effects of different objective functions on optimal decision variables: a study using modified complex method to optimize hamburger cooking. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie** 38: 111–118.

Övervik, E. and Jan-Åke Gustavsson. 1995. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from charcoal grilling. **Atmospheric Environment** 29 (13): 1553–1558.

Sánchez del Pulgar, J., A. Gázquez, J. Ruiz-Carrascal. 2012. Physico-chemical, textural and structural characteristics of sous-vide cooked pork cheeks as affected by vacuum, cooking temperature, and cooking time. **Meat Science** 90: 828–835.

Shilton, N., P. Mallikarjunan and P. Sheridan. 2002. Modeling of heat transfer and evaporative mass losses during the cooking of beef patties using far-infrared radiation. **Journal of Food Engineering** 55: 217–222.

United States Department of Agriculture. 2011. **Barbecue and food safety**. Available Source: http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome, November 1, 2015.

Viegas, O., P. Novo, E. Pinto, O. Pinho and I.M.P.L.V.O. Fereira. 2012. Effect of charcoal types and grilling conditions on formation of heterocyclic aromatic amines (HAs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled muscle foods. **Food and Chemical Toxicology** 50: 2128–2134.

การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการตัดก้อนยางวัตถุดิบให้ได้น้ำหนักตามค่าที่กำหนด เพื่อผลิตยางล้อจักรยานยนต์

Efficiency Improvement of Rubble Bale Cutting with Specific Weight for Motorcycle Tire Production

ชัชพันธ์ ขำญาติ[1*]

Chatpun Khamyat[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษากระบวนการตัดก้อนยางวัตถุดิบเพื่อผลิตยางล้อจักรยานยนต์พบว่า การทำงานของพนักงานตัดก้อนยางวัตถุดิบบนเครื่องตัดยางไฮโดรลิคแบบ 1 ใบมีด ก่อนการปรับปรุงจะใช้วิธี การประมาณระยะการตัดด้วยสายตา และความชำนาญส่วนบุคคลในการตัด ไม่มีเครื่องมือช่วยในการวัดระยะการตัดให้ได้น้ำหนักต่างๆ ทำให้ใช้เวลาในการประมาณตำแหน่งในการตัดมาก และต้องทำการตัดงานซ้ำๆอยู่เป็นประจำเนื่องจากการตัดก้อนยางไม่ได้น้ำหนักตามที่กำหนด ดังนั้นจึงดำเนินเนินการปรับปรุงกระบวนการตัดก้อนยางวัตถุดิบ และสร้างอุปกรณ์ช่วยวัดระยะที่ใช้ในการตัดก้อนยาง โดยได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดความยาวก้อนยางเข้ากับเครื่องตัดก้อนยาง พร้อมทั้งตารางคำนวณระยะความยาวของก้อนยางที่จะได้น้ำหนักต่างๆ เพื่อให้พนักงานได้ใช้เป็นระยะอ้างอิงในการตัด ผลการปรับปรุงกระบวนการตัดก้อนยาง พบว่าจากเดิมจะใช้เวลาในการตัดก้อนยางให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนดเฉลี่ย 52 วินาที/รอบ หลังการปรับปรุง ใช้เวลาในการตัดก้อนยางแท่งลดลงเหลือ 48 วินาที/รอบ ดังนั้นเวลาในการตัดก้อนยางให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนดลดลงคิดเป็น 7.69 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

A study of rubber bale cutting process with specific weight for motorcycle tire production found that the workers estimate the cutting position on rubber bale by their own eyes and experience without any measuring tool or jig for helping them to cut at correct weight specification. This is a cause of long processing time and reprocessing job. Therefore, this study improved work procedure of rubber bale cutting process and created rubber bale cutting jig for guiding the cutting position of correct weight specification. After install the jig on rubber cutting machine with created length of cutting position table, the result of improvement is processing time reduction from 52 second/bale to 48 second/bale, which is 7.69% reduction of rubber bale cutting time.

Key words: rubber cutting, cutting jig, cutting specific weight, motorcycle tire production

*Corresponding author; e-mail address: **ocpky@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineer, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันถาวะการแข่งขันในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อจักรยานยนต์มีสูง ซึ่งทำให้มีผลกระทบกับบริษัทผลิตยางล้อจักรยานยนต์ จึงจำเป็นต้องหาวิธีการในการลดต้นทุนการผลิต การศึกษาวิธีการทำงานเป็นหลักการพื้นฐานที่สามารถใช้ได้ทั่วไปในการปรับปรุงวิธีการทำงานให้มีประสิทธิภาพ เพิ่มอัตราการผลิต และลดต้นทุนการผลิต (รศ.รัชต์วรรณ, 2550) ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะปรับปรุงกระบวนการทำงานให้มีประสิทธิภาพ ลดเวลาในการแก้ไขงานซ้ำๆหลายครั้ง เพื่อลดเวลาในการทำงานของพนักงาน

ในอุตสาหกรรมการผลิตยางล้อสำหรับรถจักรยานยนต์ จะต้องมีวัตถุดิบตั้งต้นต่างๆที่ใช้ในการผลิต เช่น ยางธรรมชาติอัดแท่ง (Natural rubber) ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber) เขม่าดำ (Carbon black) น้ำมันช่วยในการแปรรูป (Rubber processing oil) เป็นต้น ดังนั้น เมื่อจะทำการผสมยางวัตถุดิบที่เรียกว่า ยางคอมปาวด์ (Compound Rubber) ก็จะต้องมีการเตรียมวัตถุดิบต่างๆให้ตรงกับสูตรการผลิตโดยในที่นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการเตรียมก้อนยางธรรมชาติ และก้อนยางสังเคราะห์ กล่าวคือเป็นการนำก้อนยางแท่ง (Rubber bale) ที่มาจากผู้ผลิตก้อนยางแต่ละชนิด ซึ่งจะมีน้ำหนักก้อนละ 35 กิโลกรัม มาตัดบนเครื่องตัดยางไฮโดรลิค แบบ 1 ใบมีด เพื่อให้ได้น้ำหนักตามสูตรการผลิตที่กำหนดไว้ ซึ่งในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน พนักงานจะใช้สายตา และความชำนาญในการประมาณความยาวของก้อนยางที่จะตัด ทำให้ต้องใช้เวลามาก และยังได้น้ำหนักที่ไม่ถูกต้อง พนักงานจึงจำเป็นต้องนำก้อนยางมาทำการตัดแก้ไขอีกครั้ง เพื่อให้ได้น้ำหนักที่ถูกต้องตามสูตรมาตรฐานการผลิต จากการตรวจสอบทั้งเอกสาร และ ไปศึกษาดูงานที่บริษัทผลิตยางล้อจักรยานยนต์หลายแห่ง พบว่าทุกบริษัทใช้กระบวนการตัดก้อนยางแบบเดียวกัน และ ยังไม่มีการใช้เครื่องมือใดๆมาช่วยในการทำงาน ซึ่งในขั้นตอนการแก้ไขนี้ก็เป็นปัญหาที่เกิดการทำงานซ้ำๆ ทำให้เสียเวลา พนักงานอาจมีความล้าเกิดขึ้นจากการแก้ไขงานได้ และสิ่งเหล่านี้อาจเป็นค่าใช้จ่ายทางอ้อมที่เกิดขึ้นกับผู้ผลิต จึงเป็นการทำให้ทางบริษัทมีภาระต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นได้ (นายธนากรณ์, 2556) ดังนั้นการลดต้นทุนการผลิตและการลดเวลาทำงาน การลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต สิ่งเหล่านี้จึงเป็นสิ่งที่ผู้ผลิตในอุตสาหกรรมยางหรือทุกๆอุตสาหกรรมอื่นๆให้ความสนใจในในการปรับปรุงกระบวนการทำงานนั้นให้ดีขึ้นและมีความสะดวกรวดเร็วและปลอดภัย การปรับปรุงกระบวนการทำงานแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ การพัฒนาออกแบบกระบวนการทำงานสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่และการพัฒนาเพื่อปรับปรุงระบบงานเดิม (นางฐิติมา, 2548) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการปรับปรุงระบบงานเดิมที่ทำอยู่ให้ทำงานได้ง่ายสะดวกรวดเร็วขึ้น ปลอดภัยและมีความถูกต้องแม่นยำเพิ่มขึ้นด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บข้อมูลการตัดยางตามสูตรการผลิต และศึกษากระบวนการตัดก้อนยางแบบเดิม

เก็บข้อมูลการตัดยางสูตร XX-N เนื่องจากมีจำนวนการผลิตในแต่ละวันมากที่สุดและจำนวนชนิดของก้อนยางวัตถุดิบที่ต้องตัดมากที่สุดที่ผลิตอยู่ในปัจจุบัน จำนวน 100 รอบ โดยที่ให้พนักงานตัดแบบปกติตามวิธีการทำงานแบบเดิม พบว่า การตัดก้อนยางวัตถุดิบชนิด STRXX สำหรับสูตร XX-N มีการตัดไม่ได้น้ำหนักตามที่กำหนดมากที่สุด และต้องนำก้อนยางมาทำการตัดแก้ไขถึง 18% จึงได้ทำการศึกษากระบวนการตัดก้อนยาง ตามหลักการศึกษาการทำงาน (นายวันชัย, 2549) โดยผู้วิจัยได้ออกแบบเอกสารแผนภาพสำหรับใช้วิเคราะห์การไหลของกระบวนการตัดก้อนยาง และได้ใช้วิเคราะห์การไหลของกระบวนการตัดก้อนยางตามวิธีการทำงานแบบเดิม ได้เอกสารแผนภาพตามรูปภาพที่ 1 (Figure 1) ดังต่อไปนี้

Flow Process Chart Document of Rubber Bale Cutting Process				
Chart No. xxxxx	Summary Result			
Product / Material / Worker Mr. xxxxx xxxxxx	Activity	Original	Improve ment	Reduction
	○	25		
Worker of STRXX rubber cutting	⇨	16		
Activity : rubble cutting with specific weight	D	7		
Standard : xxxxxxx	□	4		
Procedure : Original	▽	-		
Place : Motor Bike tire company	Total	52		

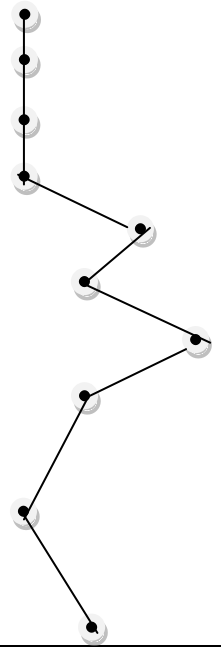
Work instruction	Time (second)	Symbols ○ ⇨ D □ ▽	Note
1. Hold suction tool on bale	2		
2. Move bale to cutting machine table	4		
3. Release suction tool from bale	4		
4. Adjust bale to find cutting position	12		
5. Press hydraulic knife to cut bale	7		
6. Move cut bale to weight table	6		
7. Measure cut bale weight and mark	4		
8. Move corrected weight bale to mixing pallet	7		
9. Move the rest of non-cut bale to hydraulic knife	3		
10. Move scrap bale out of machine	3		
Total	52		

Figure 1 Picture of flow process chart document for STRXX rubber bale original cutting process

จากรูปภาพที่ 1 (Figure 1) พบว่า ขั้นตอนที่ 4 คือ การจับก้อนยางดันเข้าสู่แท่นมีดตัด พร้อมทั้งประมาณระยะตัด ใช้เวลานานที่สุดถึง 12 วินาที จากเวลาทั้งหมด 52 วินาที/รอบ จึงนำไปสู่การปรับปรุงต่อไป

การวิเคราะห์ปัญหาในกระบวนการตัดก้อนยาง

เนื่องจากในขั้นตอนการประมาณความยาวในการตัด ต้องใช้ทักษะและความชำนาญของพนักงานที่ทำประจำ เมื่อตัดแล้วไม่ได้น้ำหนักตามที่กำหนด พนักงานต้องทำการแก้ไขโดยนำก้อนยางมาตัดใหม่ให้ได้น้ำหนักที่กำหนด ทำให้เสียเวลา จึงได้วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดก้อนยางแล้วไม่ได้น้ำหนักตรงตามที่กำหนดจากพนักงานที่ทำประจำโดยใช้แผนภูมิก้างปลา (รศ.ชุมพล, 2550) พบว่าปัจจัยคือ ไม่มีอุปกรณ์ที่ช่วยในการประมาณความยาวการตัด (Jig) หรือมาตรบอกระยะต่างๆ ที่เครื่องตัดยาง ทำให้น้ำหนักก้อนยางที่ตัดไม่มีความ

ถูกต้อง ดังนั้นการแก้ไขปัญหาหลัก คือ การจัดทำ Jig วัดความยาวการตัดของก้อนยาง เพื่อบอกตำแหน่งในการตัดก้อนยางให้ได้น้ำหนักถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีการดำเนินงานต่อไป

การปรับปรุงกระบวนการตัดก้อนยางโดยหลักการของ การใช้อุปกรณ์ช่วยในการประมาณระยะการตัดก้อนยาง (Jig)

ก้อนยางชนิด STRXX ผู้ผลิตระบุว่าค่าความหนาแน่นเฉลี่ยคือ 0.92 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร โดยจะมีขนาดก้อนยาง กว้าง 36 เซนติเมตร ยาว 66 เซนติเมตร และ สูง 16 เซนติเมตร หนักก้อนละ 35 กิโลกรัม จากการสุ่มตัวอย่างก้อนยางชนิด STRXX จากผู้ผลิตจำนวน 10 ก้อนนำมาวัดขนาด พบว่าก้อนยางเสียรูปจากการจัดเก็บและขนส่ง ทำให้ความกว้างและความสูงไม่ได้ขนาดตามที่ผู้ผลิตระบุไว้ จึงไม่สามารถใช้ค่าความหนาแน่นมาคำนวณเป็นระยะความยาวเพื่อสร้าง Jig ในการตัดก้อนยางให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนดได้โดยตรง จากปัญหาการเสียรูปของก้อนยางจากผู้ผลิตนี้ไม่สามารถแก้ไข และควบคุมได้ ผู้วิจัยจึงทำการสุ่มตัวอย่างก้อนยางชนิด STRXX จากผู้ผลิตจำนวน 10 ตัวอย่างนำมาหาค่าเฉลี่ยของ ความกว้าง และความสูง ของก้อนยางเพื่อคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดค่าเฉลี่ยของก้อนยาง พบว่าก้อนยางชนิด STRXX มีพื้นที่หน้าตัดค่าเฉลี่ย 539.51 ตารางเซนติเมตร หลังจากนั้นจึงใช้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย มาคำนวณหาระยะความยาวของก้อนยางสำหรับค่าน้ำหนักต่างๆ ได้ค่าดังตารางที่ 1 (Table 1) เพื่อนำไปสร้างมาตรวัดระยะความยาวในการตัดก้อนยางของ Jig สำหรับบอกตำแหน่งการตัดก้อนยางให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนดต่อไป

Table 1 Calculated length for any specific weight of STRXX rubber bale cutting process

Calculated length for any specific weight of STRXX rubber	
Weight (kg)	**Length of Rubber bale** (cm)
2	4.03
4	8.06
6	12.09
8	16.12
10	20.15
12	24.18
14	28.21
16	32.24
18	36.26
20	40.26

การสร้าง และติดตั้งอุปกรณ์ประมาณความยาวการตัดก้อนยางให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนด (Jig)

นำแท่งรางเหล็กขนาดกว้าง 3.5 เซนติเมตร สูง 3.5 เซนติเมตร และ ยาว 50 เซนติเมตร มาทำการเซาะร่องแบ่งมาตรวัด เป็นช่องๆ ช่องละ 2 เซนติเมตร พร้อมทั้งเขียนตัวเลขกำกับบนแท่งเหล็กดังรูปที่ 2 (Figure 2)

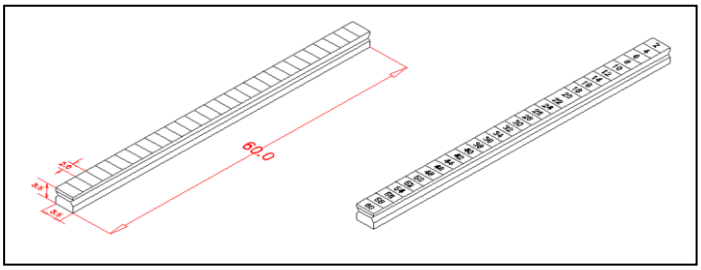


Figure 2 Scale of cutting length for any specific weight of STRXX rubber bale cutting jig

จากนั้นสร้างตัวเลื่อนชี้ตำแหน่ง (Linear slide) โดยใช้แกนสปริงเป็นตัวชี้ตำแหน่งมาติดตั้งกับขายึดที่สามารถเลื่อนไปบน รางเหล็กมาตรวัดได้ เพื่อใช้เป็นตัวบอกตำแหน่งในการตัด โดยแกนสปริงชี้ตำแหน่งสามารถยืดหยุ่นตัวได้เพื่อลดการเสียหาย ของทั้งตัวชี้ตำแหน่งและรางเหล็กมาตรวัดเมื่อมีก้อนยางมาดันบริเวณสปริง ได้อุปกรณ์เลื่อนชี้ตำแหน่งการตัดก้อนยางดังรูปภาพที่ 3 (Figure 3)

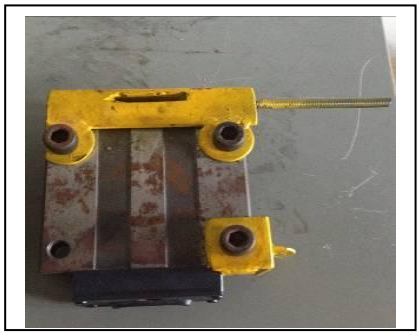


Figure 3 Linear sliding for indicting length of cut of any specific weight

เมื่อประกอบ ตัวเลื่อนชี้ตำแหน่ง และ รางเหล็กมาตรวัด เข้ากับเครื่องตัดก้อนยางเดิมที่มีใช้อยู่แล้ว จะได้เครื่องตัดก้อนยางที่มีอุปกรณ์ประมาณความยาวการตัดก้อนยางให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนด (Jig) ตามภาพวาดในการออกแบบในรูปภาพที่ 4 (Figure 4) และ ภาพถ่ายอุปกรณ์จริงในรูปภาพที่ 5 (Figure 5) ที่ได้ติดตั้งกับเครื่องตัดก้อนยางไฮโดรลิค แบบ 1 ใบมีดที่มีใช้อยู่เดิมแล้วเพื่อทำการทดลองใช้งาน และ ประเมินผลต่อไป

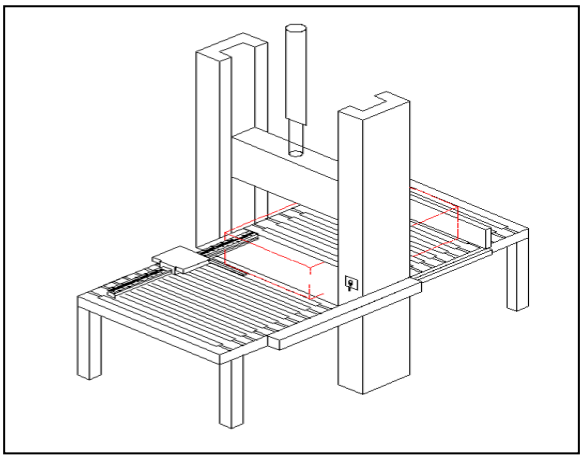


Figure 4 Drawing of rubber bale cutting jig with installation lay out on existing rubber cutting machine



Figure 5 Photo of Rubber bale cutting jig after finished installation

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการปรับปรุงวิธีการทำงานในกระบวนการตัดก้อนยาง โดยใช้อุปกรณ์ประมาณความยาวการตัดก้อนยางให้ได้น้ำหนักตามที่กำหนด (Jig)

จากการติดตั้งอุปกรณ์ประมาณความยาวการตัดก้อนยาง และปรับปรุงวิธีการทำงาน พบว่าพนักงานสามารถทำงานได้ง่ายขึ้น พนักงานสามรถหาระยะความยาวของก้อนยางที่จะตัดสำหรับน้ำหนักต่างๆได้อย่างใกล้เคียงมาตรฐานมากขึ้น โดยดูจากตารางความยาวการตัดก้อนยาง (Table 1) ที่ทำขึ้นมา เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการตัดก้อนยางที่ระยะต่างๆได้ พนักงานไม่ต้องเสียเวลาในการประมาณระยะตัดมาก และไม่ต้องทำการแก้ไขงานซ้ำ ซึ่งหลังการปรับปรุง ได้ทำการวิเคราะห์แผนภูมิการไหลของกระบวนการตัดก้อนยางแท่งใหม่ตามรูปภาพที่ 6 (Figure 6) พบว่า ขั้นตอนที่ 4 คือ การจับก้อนยางดันเข้าสู่แท่นมีดตัด พร้อมทั้งประมาณระยะตัดใช้เวลา 8 วินาที ลดลงจากเดิมที่ใช้ 12 วินาที ทำให้ใช้เวลาทั้งหมดเป็น 48 วินาที/รอบ ลดลงจากเดิมที่ใช้ 52 วินาที/รอบ

ผลจากการทดลองใช้อุปกรณ์ประมาณความยาวการตัดก้อนยาง ตัดยาง STRXX ที่น้ำหนัก 10 กิโลกรัม จำนวน 100 รอบ เพื่อทดสอบสมมุติฐานทางสถิติว่าค่าน้ำหนักก้อนยางถูกต้องของตามที่กำหนดหรือไม่ ผลการทดสอบสมมุติฐานที่ระดับนัยสำคัญ α = 0.05 พบว่า ได้ค่า Z = 0.95 อยู่ในช่วงการยอมรับว่า อุปกรณ์ประมาณความยาวการตัดก้อนยาง (Jig) ให้ค่าความยาวการตัดก้อนยางถูกต้องได้ค่าน้ำหนักก้อนยางตามที่กำหนด โดยไม่พบว่ามีการตัดก่อนยางไม่ได้ตามน้ำหนักที่กำหนดเลย (0%) จากเดิมก่อนปรับปรุงที่ต้องนำก้อนยางมาทำการตัดแก้ไขถึง 18%

สรุป

การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการตัดก้อนยางวัตถุดิบให้ได้น้ำหนักตามค่าที่กำหนด เพื่อผลิตยางล้อจักรยานยนต์ โดยใช้ชุดอุปกรณ์ประมาณความยาวการตัดก้อนยางที่ได้สร้างขึ้น และการปรับปรุงวิธีการทำงานตามการวิจัยนี้ ทำให้พนักงานปฏิบัติงานได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ลดเวลาการตัดก้อนยางชนิดSTRXXลง4 วินาที/รอบจากเดิมใช้เวลา 52 วินาที /รอบ เหลือ 48 วินาที/รอบ คิดเป็นเวลาที่ลดลง 7.69 เปอร์เซ็นต์ และยังตัดก้อนยางได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยในขณะทำการวิจัยไม่พบว่ามีการต้องนำก้อนยางมาตัดแก้ไขซ้ำอีก

Flow Process Chart Document of Rubber Bale Cutting Process				
Chart No. xxxxx	Summary Result			
Product / Material / Worker Mr. xxxxx xxxxxx	Activity	Original	Improvement	Reduction
	○	25	21	4
Worker of STRXX rubber cutting	⇨	16	16	
Activity : rubble cutting with specific weight	D	7	7	
Standard : xxxxxxx	□	4	4	
Procedure : Improvement	▽	-	-	
Place : Motor Bike tire company	Total	52	48	4

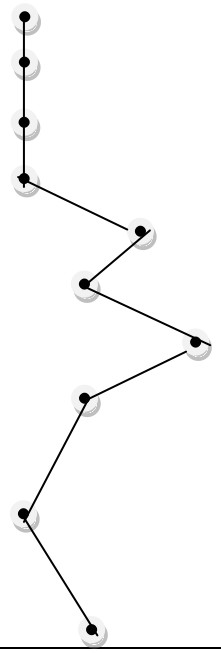
Work instruction	Time (second)	Symbols ○ ⇨ D □ ▽	Note
1. Hold suction tool on bale	2		
2. Move bale to cutting machine table	4		
3. Release suction tool from bale	4		
4. Adjust bale to find cutting position	8		
5. Press hydraulic knife to cut bale	7		
6. Move cut bale to weight table	6		
7. Measure cut bale weight and mark	4		
8. Move corrected weight bale to mixing pallet	7		
9. Move the rest of non-cut bale to hydraulic knife	3		
10. Move scrap bale out of machine	3		
Total	48		

Figure 6 Picture of flow process chart document for STRXX rubber bale cutting process with cutting jig (after improvement)

เอกสารอ้างอิง

รศ. ชุมพล ศฤงคารศิริ. 2550. **การวางแผนและควบคุมการผลิต**. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

นางฐิติมา ไชยกุล. 2548. **หลักการจัดการการผลิตเบื้องต้น**. บริษัทเพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า, กรุงเทพฯ.

รศ. รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม. 2550. **การศึกษางานอุตสาหกรรม** (Industrial work study). บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

นายวันชัย ริจิรวนิช. 2549. **การศึกษาการทำงาน: หลักการและกรณีศึกษา**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

นายธนากรณ์ ยุบลมาตย์. 2556 **การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการตัดแต่งเนื้อสัตว์ กรณีศึกษาการตัดแต่งเนื้อเพื่อผลิตสินค้าชุบแป้งทอด** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

การตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิตโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง

Inspection of Orifice Plate Flatness Using Laser Light Techniques

ภาทิล อัครกูรวิชญ[1*] วิทยา ทิพย์สุวรรณพร[1] และ ทวีพล ซื่อสัตย์[1]

Phathill Akkarakrurawish[1*], Vittaya Thipsuwannaporn[1], and Taweepol Suesut[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอในเรื่องการตรวจสอบความราบเรียบของแผ่นออริฟิตแบบไม่สัมผัส โดยวัดความราบเรียบผิวของวัตถุด้วยเทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวางซึ่งเป็นการฉายลำแสงเลเซอร์ไปบนพื้นผิวของแผ่นออริฟิตเพื่อเป็นตัวกำหนดลักษณะของวัตถุตัวอย่างที่จะทำการตรวจหาความราบเรียบของผิววัตถุจากกล้องด้วยการประมวลผลภาพบนโปรแกรม แผ่นออริฟิตที่ทำการทดสอบจะวางอยู่กับชุดหมุนชิ้นงานซึ่งถูกติดตั้งกับมอเตอร์ความเร็วต่ำอยู่ที่แกนเพลา ความหนาของแผ่นออริฟิตจะถูกสร้างขึ้นจากภาพตัวอย่างจากเส้นลำแสงเลเซอร์และทำการประมวลผลภาพเพื่อนำมาคำนวนหาขนาดความหนาของแผ่นออริฟิตแล้วโปรแกรมจะทำการเก็บข้อมูลความหนาแผ่นออริฟิต หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปทำการประมวลผลโดยใช้การอ้างอิงจากสมการเส้นตรง จากการทดสอบระบบการประมวลผลภาพจากโปรแกรมสามารถแยกแยะวัตถุที่ดีและเสียได้ถูกต้องและแม่นยำ แต่การบ่งชี้จุดที่เกินมาตรฐานบนแผ่นออริฟิตควรต้องมีการพัฒนาต่อไปเพื่ออำนวยความสะดวกกับผู้ที่ใช้งาน

ABSTRACT

The research presents a non-contact inspection of orifice plate flatness based on laser light techniques. The laser source projects a laser beam (red light) on the orifice plate and the CCD camera equipped with filter captures image of red laser beam. The image processing algorithms applies to enhance the laser line image quality then the calculation of orifice plate flatness processes via Lab View application. The sampling data automatically logs and processes reference to Linear Equation System in order to identify the accepted or rejected orifice plate. The experiment indicates that the established software application can precisely detect the accepted or rejected orifice plate but the system will develop to identify defective areas on the orifice plate for user accommodation.

Key Words: Orifice Plate, Flatness, Machine Vision, Laser Techniques

* Corresponding author; e-mail address: tab.n@hotmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 10520

คำนำ

ปัจจุบันมีมาตรวัดปริมาตรก๊าซธรรมชาติแหลกหลายแบบที่ใช้ทำการวัด เช่น การวัดแบบความดันแตกต่าง การวัดแบบอัลตร้าโซนิค ฯลฯ ในประเทศไทยมาตรวัดปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ผลิตจากแท่นนอกฝั่งทุกแท่นจะถูกวัดด้วยมาตรวัดแบบความดันแตกต่างแบบออริฟิตซึ่งการวัดจะอ้างอิงตามข้อกำหนดมาตาฐานของสถาบันปิโตรเลียมแห่งสหรัฐอเมริกา (American Petroleum Institute – [API], 2000) บทที่14.การวัดก๊าซธรรมชาติ หมวดที่ 3 มาตรวัดออริฟิตขอบคมแบบวงกลมร่วมศูนย์กลาง จะมีทั้งหมด 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 สูตรการคำนวนทั่วไปและแนวทางของความไม่แน่นอนในการวัด ส่วนที่ 2 ข้อมูลจำเพาะและสิ่งที่จำเป็นในการติดตั้งมาตรวัด และส่วนที่ 3 การประยุกต์ใช้สำหรับก๊าซธรรมชาติ โดยจุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้จะเลือกทำการวิจัยในส่วนของการประมาณค่าความราบเรียบของแผ่นออริฟิตเพื่อตรวจสอบว่าแผ่นออริฟิตนั้นยังสามารถใช้งานได้ตามข้อกำหนด (API, 2000)

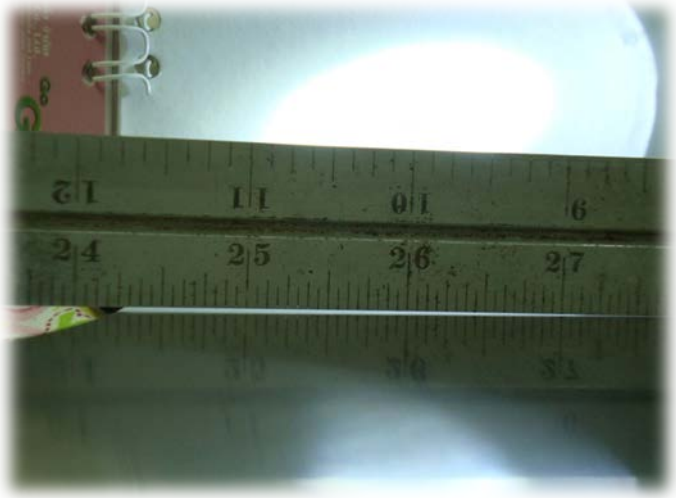


Figure 1 Current Methodology for Orifice Plate Flatness Identification

รูปที่ 1 เป็นวิธีที่ใช้การวัดแบบในปัจจุบันโดยใช้ไม้บรรทัดมาตรฐานทาบลงบนแผ่นออริฟิตแล้วใช้แหล่งกำเนิดแสงส่องเพื่อหาความไม่ราบเรียบ วิธีการวัดแบบนี้เป็นแบบซุ่มและใช้เวลานานหากจะวัดให้ได้ทั่วทั้งแผ่นซึ่งอาจจะทำให้เกิดความผิดผลาดในการวัดได้ ดังนั้นการวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีเครื่องจักรกลวิทัศน์ (F.Pernkopf *et al*., 2003) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินหาความราบเรียบของแผ่นออริฟิตแบบต่อเนื่องตลอดทั้งแผ่น โดยการประมวลผลจากข้อมูลภาพที่ได้จากลำแสงเลเซอร์ตัดขวางที่กระทบลงพื้นผิวของวัตถุ โดยเป็นการวัดเป็นแบบสองมิติ (Daniel F. Garcia *et al*., 2002; Shiping Zhu *et al*., 2008) ภาพที่ได้จะถูกทำการแปลงข้อมูลขนาดรูปภาพเป็นข้อมูลพิกัดในระบบสองมิติเพื่อหาขนาดของวัตถุตัวอย่าง (M. F. M. Costa, 1996; M. F. M. Costa, 2001; D. F. Garcia *et al*., 2002) ในบทความนี้ได้ทำการทดสอบแผ่นออริฟิตที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-12 นิ้ว ซึ่งมีทั้งแผ่นแผ่นออริฟิตที่ผ่านมาตรฐานและไม่ผ่านมาตรฐาน (API, 2000) มาทำการทดสอบเพื่อศึกษาว่าเทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุสามารถบ่งชี้แผ่นออริฟิตที่ดีและเสียได้

อุปกรณ์และวิธีการ

ชุดทดลองระบบการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ

รูปที่ 2 แสดงชุดการทดลองระบบแสงเลเซอร์ตัดขวางสำหรับวัดความราบเรียบของวัตถุ ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักคือ 1) แท่นวางชิ้นงานพร้อมแกนเพลาติดกับมอเตอร์ความเร็วต่ำ, 2) กล้องจับภาพ, 3) แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ และ 4) คอมพิวเตอร์ประมูลผล วัตถุตัวอย่างจะถูกวางบนที่วางชิ้นงานมีลักษณะเป็นวงกลมและจะถูกหมุนด้วยมอเตอร์ความเร็วต่ำที่ความเร็วรอบคงที่ 5 รอบต่อนาที โดยติดตั้งแสงเลเซอร์ให้เส้นของแสงเลเซอร์ฉายไปในทิศทางขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์ตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งเลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์แบบเส้นสีแดงมีความยาวคลื่น 650 - 670 nm ขนาด 5 mW (Roithner Laser Technik, Austria) และทำการเก็บข้อมูลรูปภาพโดยใช้กล้องรุ่น Basler Gig E รุ่น acA640-120-gc ความละเอียดในการรับภาพ 658 Pixels x 492 Pixels และอัตราความเร็วในการรับภาพ 120 เฟรมต่อวินาที โดยข้อมูลรูปภาพที่ได้มาจะเป็นข้อมูลความหนาของแผ่นออริฟิตแต่ละจุดบนพื้นผิวของแผ่นออริฟิต เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ก็จะได้ข้อมูลในส่วนถัดไปของวัตถุจนครบ 1 รอบ

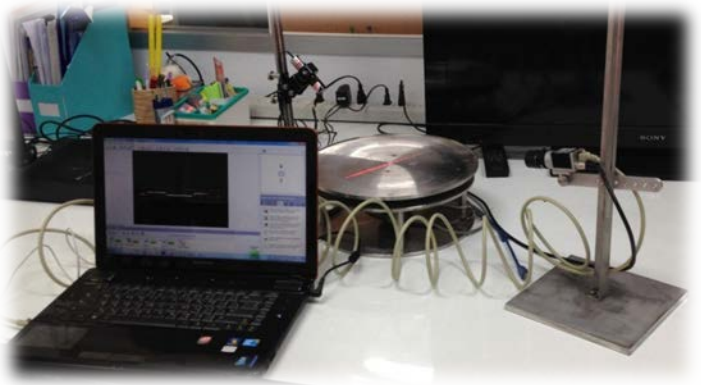


Figure 2 Inspection of Orifice Plate Flatness Using Laser Light Techniques System

เทคนิคการใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สีแดงมีความยาวคลื่น 650 - 670 nm ลงบนพื้นผิวของวัตถุเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ เนื่องจากนำมาวิเคราะห์และประมวลผลได้ง่ายและขั้นตอนในการปรับแต่งรูปภาพน้อย แสงเลเซอร์ที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้อง CCD ที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (M. F. M. Costa, 1996) โดยข้อมูลรูปภาพที่ได้มาจะเป็นข้อมูลความหนาของแผ่นออริฟิตแต่ละจุดบนแผ่นออริฟิต เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ก็จะได้ข้อมูลในส่วนถัดไปของวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวางของแต่ละส่วนดังรูปที่ 4 และนำมารวมกันเพื่อสร้างเป็นระบบพิกัดแบบสองมิติที่เป็นตัวบอกได้ถึงความหนาของแผ่นออริฟิตนั้น ๆ ด้วยเทคนิคการใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุนี้ ทำให้การวัดมีความสะดวกและรวดเร็วกว่าการวัดที่เป็นรูปแบบปัจจุบัน จากการจับเวลาในช่วงการทดลองจะใช้เวลาตั้งแต่เริ่มทำการวัดจนถึงการวัดเสร็จสิ้นภายใน 2 นาทีต่อการวัด 1 ครั้งทำให้ผู้ใช้งานมี

สะดวกและรวดเร็วในการที่จะตัดสินใจได้ว่าชิ้นงานผ่านตามข้อกำหนดมาตรฐาน หรือไม่เมื่อเปรียบเทียบกับการวัดในแบบวิธีดั้งเดิมตามรูปที่ 1 (API, 2000)

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมและการประมวลผลภาพ

จากรูปที่ 3 จะเป็นขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการรับภาพและการประมวลผลภาพซึ่งภาพที่ได้จากกล้อง Basler Gig E จะถูกนำมาทำการปรับปรุงแก้ไขโดยแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดตามรูปที่ 4 หลังจากนั้นจะนำภาพที่ได้ถูกปรับปรุงแก้ไขไปคำนวนหาความหนาของแผ่นออริฟิตจนถึงการเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2013 ในแต่ล่ะขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะสามารถอธิบายการทำงานเบื้องต้นได้ดังนี้

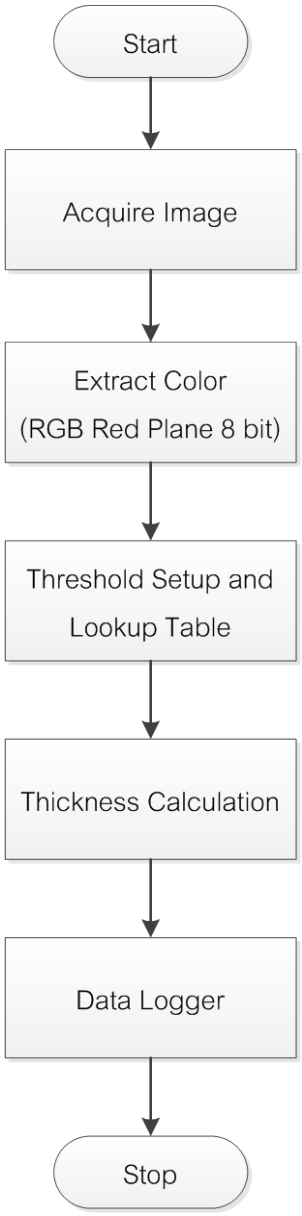
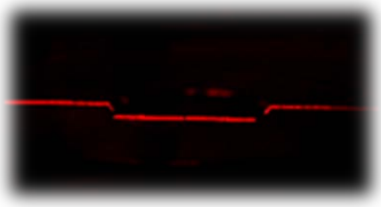
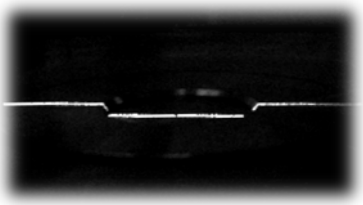


Figure 3 Flowchart of Image Processing



Acquire Image – acquires image from camera.



Extract Color - extracts red plane of color image.



Threshold and Lookup Table – isolates pixels and modifies the dynamic intensity of regions.

Figure 4 Image Processing Step

- Acquire Image คือกระบวนการรับภาพจากกล้อง Basler Gig E
- Extract Color Planes คือกระบวนการดึงโครงร่างของแสงเลเซอร์สีแดงที่ต้องการออกจากภาพ ภาพที่ได้เป็นภาพ grayscale
- Threshold Setup and Lookup Table คือกระบวนการแยกโครงร่างของแสงเลเซอร์ที่มีค่าความเข้มของแสงอยู่ในช่วงตามที่ต้องการออกจากภาพและเปลี่ยนภาพ grayscale ให้มีเฉพาะสีดำกับสีขาว
- Calculation คือกระบวนการแปลงจำนวน Pixel สีขาวของภาพในแต่ละ Cross Section ให้เป็นพื้นที่และทำการรวมพื้นที่ของแต่ละส่วนให้เป็นความหนา
- Data Logger คือกระบวนการเก็บข้อมูลความหนาของแผ่นออริฟิตในแต่ล่ะช่วงเวลา

การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากที่โปรแกรมทำการเก็บข้อมูล ข้อมูลนั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยรีเกสชั่น (Regression Analysis) โดยการหาความสัมพันธ์ความหนาของแผ่นออริฟิตทั้งด้านซ้ายและด้านขวาเพื่อตัดสินใจว่าแผ่นออริฟิตแผ่นนั้นมีว่าราบเรียบหรือไม่ การวิเคราะห์ด้วยรีเกสชั่นเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผันตาม y เป็นแบบเชิงเส้นของอีกหนึ่งตัวแปรอิสระ X ดังนั้นสมการเชิงคณิตศาสตร์เขียนในรูปแบบ

$$y = b_0 + b_1 x \quad (1)$$

โดยที่ b_0 ใหเป็นจุดตัดเส้นรีเกสชั่นบนแกน y และ b_1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์รีเกสชั่นแทนความชันของเส้นรีเกสชั่น (A. D. Aczel, 1995.) เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาแทนลงสมการแล้วหาค่าสัมประสิทธิ์กำหนด (R^2) จะพบว่าถ้าแผ่นออริฟิตนั้นมีความราบเรียบผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (API, 2000) ค่า R^2 นั้นมีค่าเข้าใกล้ 1 ตรงกันข้ามถ้าแผ่นออริฟิตนั้นมีความราบเรียบไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (API, 2000) ค่า R^2 นั้นมีค่าออกห่าง 1 (M. Ozgur Yayli et al., 2015)

แผ่นออริฟิตตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้จะนำแผ่นออริฟิตที่มีขนาดแตกต่างตั้งแต่ขนาด 4-12 นิ้วซึ่งมีทั้งแผ่นที่ผ่านและไม่ผ่านตามข้อกำหนดมาตาฐาน (API, 2000) โดยใช้เวอเนียร์คาลิปเปอร์เพื่อทำการสอบเทียบค่ามาตรฐานขนาดความหนาของแผ่นออริฟิต (สูง) แล้วมาเปรียบเทียบกับวิธีการที่ได้นำเสนอเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดผลาด



Figure 5 Example of Accepted Orifice Plates



Figure 6 Example of Rejected Orifice Plates

การสอบเทียบความหนาแผ่นออริฟิต

ในการทดลองได้ทำการสอบเทียบความหนาของแผ่นออริฟิตขนาด 1-12 นิ้วจำนวน 6 แผ่นเทียบกับเวอเนียร์คาลิปเปอร์เพื่อทดสอบความผิดพลาดจากวิธีการนำเสนอ ในรูปที่ 7 แสดงกราฟค่าความผิดพลาดของการสอบเทียบ พบว่าค่าที่ได้มีค่าความผิดพลาดจากการสอบเทียบน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

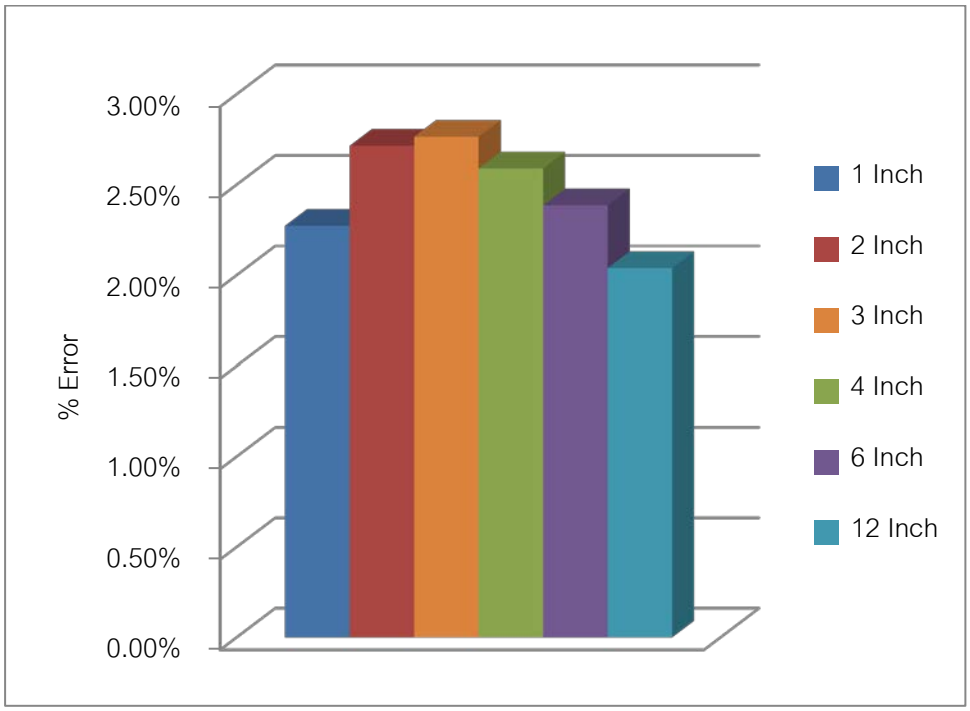


Figure 7 Error of Orifice Plate Thickness Measurement

ผลการทดลองและวิจารณ์

ระบบการตรวจวัดความหนาของแผ่นออริฟิตโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุเพื่อไปประยุกต์ใช้กับการหาความเรียบราบของแผ่นออริฟิต โดยการหาความสัมพันธ์ของความหนาของแผ่นออริฟิตทั้งสองด้านมาเปรียบเทียบกันโดยอ้างอิงจากสมการเส้นตรงแบบตัวแปรถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) แล้วใช้ค่าสัมประสิทธิกำหนด (R^2) เพื่อบ่งชี้ว่าแผ่นออริฟิตมีความราบเรียบหรือไม่ ตัวอย่างแผ่นออริฟิตที่นำมาทดสอบมีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งเป็นแผ่นที่ดีจำนวน 6 แผ่นขนาด 1, 2, 3, 4, 6 และ 12 นิ้ว และแผ่นที่เสียจำนวน 6 แผ่นขนาด 2, 3, 4, 6, 8, และ 12 นิ้ว ในการทดลองจะทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งต่อแผ่นออริฟิต 1 แผ่น ข้อมูลความหนาของแผ่นออริฟิตทั้ง 2 ด้านขณะหมุนผ่านแสงเลเซอร์จะถูกเก็บบันทึกในรูปแบบไฟล์ CSV (Comma Separated Value) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากไฟล์ CSV ไปทำการแปลงเป็นให้อยู่ในรูปแบบของ Excel เพื่อนำข้อมูลนั้นมาทำการวิเคราะห์หาค่า R^2

ผลจากการทดลองในตารางที่ 1 จะแสดงให้เห็นค่า R^2 ที่ได้จากความสัมพันธ์ของความหนาของแผ่นออริฟิตที่ดี และ R^2 ที่ได้จากความสัมพันธ์ของความหนาของแผ่นออริฟิตที่เสียจากการทดลองใช้เทคนิคการตรวจวัดความหนาของแผ่นออริฟิตโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ

Table 1 Table of Accepted and Rejected Orifice Paste Linear Regression (R^2)

Orifice Plate Size (Inch)	Accepted Orifice Paste Linear Regression (R^2)				Rejected Orifice Paste Linear Regression (R^2)			
	1st	2nd	3rd	Average	1st	2nd	3rd	Average
1	0.989	0.977	0.980	0.982	-	-	-	-
2	0.984	0.975	0.974	0.978	0.735	0.720	0.719	0.725
3	0.991	0.995	0.995	0.994	0.893	0.897	0.888	0.893
4	1.004	1.004	1.003	1.004	0.694	0.681	0.689	0.688
6	0.958	0.960	0.959	0.959	0.482	0.456	0.478	0.472
8	-	-	-	-	0.823	0.809	0.805	0.812
12	0.995	0.995	0.993	0.994	0.677	0.670	0.674	0.674

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 จะพบว่าแผ่นออริฟิตที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะมีค่าเฉลี่ย R^2 มากกว่า 0.950 ขึ้นไปในขณะที่แผ่นออริฟิตที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะมีค่าเฉลี่ย R^2 น้อยกว่า 0.900 ลงไป

สรุป

การวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิตด้วยวิธีจักรกลวิทัศน์โดยอาศัยเทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ พบว่าเทคนิคนี้สามารถตรวจสอบแยกแยะความราบเรียบของแผ่นออริฟิตได้ดี แต่ยังต้องนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลที่โปรแกรม Excel อีกครั้งซึ่งยังไม่ค่อยมีความสะดวกในการใช้งานเพราะยังไม่เป็นแบบอัตโนมัติและยังพบว่ามีปัจจัยอื่นที่ทำให้การวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิตมีความคลาดเคลื่อนได้ เช่น ปัญหาที่เกิดจากระยะการจับภาพของแผ่นออริฟิตที่มีขนาดน้อยกว่า 6 นิ้วกับแผ่นออริฟิตที่มีขนาดมากกว่า 6 นิ้วมีระยะไม่เท่ากันเท่าให้ต้องมีการปรับระยะการจับภาพใหม่ทุกครั้ง การปรับปรุงควรทำการเพิ่มเติมตัวปรับระยะการจับภาพให้มี 2 ระยะเพื่อจะทำให้การทำงานของชุดการวัดความราบเรียบของแผ่นออริฟิตมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

American Petroleum Institute, 2000. **Chapter 14 Natural Gas Fuel Measurement, Section 3 Concentric Square Edged Orifice Meters, Part 2 Specification and Installation Requirement**, 4-9

A. D. Aczel, 1995. **Statistics Concepts and Applications**. New York: Richard D. Irwin Inc.

M. F. M. Costa, 1996. **Surface inspection by an optical triangulation method**., *In* **Proceeding of SPIE - Optical Engineering**, vol. 35, no. 9, pp. 2743–2747, September 1996.

M. F. M. Costa, 2001. Noninvasive microtomographic inspection of rough surfaces by active triangulation. *In* **Proceeding of SPIE - Laser Metrology Precision Measurement Industry**. September 2001, vol. 4420, pp. 174–184.

A.Criminisi, I.Reid and A.Zisserman, 2000. **Single View Metrology**, International Journal of Computer vision, 40(2), 123-148.

F.Pernkopf and P.O'Leary, 2003. Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces, *In* **Proceeding of NDT&E International Conference 2003**, Vol.36, 609–617.

N.Nunak and T.Suesut, 2007. Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision, *In* **Proceeding of PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007**. Thailand.

Daniel F. Garcia, Fellow, IEEE, Manuel Garcia, Faustino Obeso, and Valentin Fernandez, 2002. Flatness Measurement System Based on a NonLinear Optical Triangulation Technique. *In* **Proceeding of IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**. April 2002, Vol.51, No.2, 188-195

D. F. Garcia, M. Garcia, F. Obeso, and V. Fernandez, 2002. Flatness measurement system based on a nonlinear optical triangulation technique, *In* **Proceeding of IEEE Transaction on Instrument and Measurement**, vol. 51, no. 2, pp. 188–195, Apr. 2002.

N. Katafuchi, M. Sano, S. Ohara, and M. Okudaira, 2000. A method for inspecting industrial parts surfaces based on an optics model. *In* **Proceeding Machine Vision and Application**, vol. 12, no. 4, pp. 170–176, Dec. 2000.

Shiping Zhu, Member, IEEE, Jiancheng Fang, Rui Zhou, Jianhui Zhao, and Wenbo Yu, 2008. A New Noncontact Flatness Measuring System of Large 2-D Flat Workpiece. *In* **Proceeding of IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**. December 12, 2008, Vol.57, 2891-2903.

Yayli, M.O., Kandemir, S.Y. and Toklu, Y.C., 2015. Assessment of Lunar Material. *In* **Proceeding of Recent Advances in Space Technologies, IEEE International Conference**. 7-9, Jun. 2015.

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วในจังหวัดจันทบุรี

Life Cycle Assessment of Melon in Syrup in Chanthaburi Province

สุภิญญา เสือสะอาด[1*] และปุณณมี สัจจกมล[1]

Supinya Suesa-ard[1*] and Punnamee Sachakamol[1]

บทคัดย่อ

เมล่อนเป็นพืชเศรษฐกิจที่ได้รับความนิยมและมีอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลทางสถิติพบว่าในปี 2557 ประเทศไทยมีพื้นที่การเพาะปลูกเมล่อน 1,114 ไร่ ให้ปริมาณผลผลิตทั้งสิ้น 5,339 ตัน โดยมีอัตราการเติบโตของผลผลิตเพิ่มขึ้นจากปี 2556 จากเดิม 2,800 ตัน คิดเป็นร้อยละ 90 ของปริมาณผลผลิตทั้งหมด และเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ จึงแปรรูปเมล่อนเป็นผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้ว ซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญ มีศักยภาพในการแข่งขันสูง สามารถขยายช่องทางการค้าสู่ตลาดเศรษฐกิจสากลได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวัฏชีวิตของผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วในจังหวัดจันทบุรี โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment : LCA) เพื่อประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ต่อสิ่งแวดล้อม โดยการประเมินร่องรอยการใช้น้ำเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ (Water Footprint) ตั้งแต่กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่งและกระบวนการผลิต เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการรักษาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน และช่วยเพิ่มขีดความสามารถทางการค้าระหว่างประเทศ โดยจากการศึกษาพบว่า การได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้ว 1 ถุง น้ำหนักสุทธิ 2,000 กรัม ต้องการปริมาณการใช้ทรัพยากรน้ำเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ 688.86 ลิตร

ABSTRACT

Melon is an important economic crop in Thailand with rapidly growth in demand and productivity. According to the statistics it shows that in 2014, Thailand had harvesting area of 1,114 rai with 5,339 ton yield of products. The growth rate of productivity increases from 2013 with only 2,800 ton yield of products, representing 90 percent of the total output. In order to increase the value and extend the shelf life of the products, the fresh products can be processed into Melon in syrup with the high potential growth and expanded to international trade channels. This research aims to study the Life Cycle Assessment (LCA) of melon in syrup in Chanthaburi to assess the environmental impact of products, mainly on the Water Footprint. The assessment starts from the acquisition of raw materials, transportation, and manufacturing processes. The finding from research will aid to determine the environmental impact cause and lead to better environmental sustainability. One unit of 2,000 grams of Melon in Syrup requires 688.86 lite of water

Key Words: Water Footprint, Life Cycle Assessment, Melon

* Corresponding author; e-mail address: chaboo_8@hotmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เมล่อน (Melon) เป็นพืชเศรษฐกิจใหม่ที่เริ่มได้รับความนิยมในประเทศไทย เป็นพืชอายุสั้น ให้ผลตอบแทนสูง สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี โดยมีพื้นที่การเพาะปลูกหลักที่สำคัญดังนี้ ภาคตะวันออก ได้แก่ ฉะเชิงเทรา สระแก้วและจันทบุรี ภาคกลาง ได้แก่ สุพรรณบุรี อ่างทอง และกาญจนบุรี (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2557) เนื่องจากสภาพภูมิอากาศและสภาพดินในประเทศไทยเหมาะแก่การเพาะปลูกส่งผลให้เมล่อนมีคุณภาพดี มีศักยภาพในการแข่งขันสูงเทียบเท่าต่างประเทศ และมีผลผลิตต่อพื้นที่การเพาะปลูกสูง จากข้อมูลทางสถิติปี 2557 พบว่าประเทศไทยมีพื้นที่การเพาะปลูกเมล่อนทั้งหมด 1,114 ไร่ ให้ผลผลิตเฉลี่ย 2 ตันต่อไร่ และให้ผลผลิตเฉลี่ย 5,339 ตันต่อปี ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2556 ร้อยละ 90 จากเดิมผลผลิต 2,800 ตันต่อปี (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) จะเห็นได้ว่าการเพาะปลูกเมล่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากตลาดมีความต้องการสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมล่อนจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญ และมีโอกาสเติบโตค่อนข้างสูง ซึ่งปัจจุบันการผลิตเมล่อนไม่เพียงพอต่อความต้องการบริโภค อีกทั้งอายุการเก็บรักษาเมล่อนผลสดค่อนข้างสั้น จึงเกิดการแปรรูปเมล่อนเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ เมล่อนลอยแก้ว น้ำเมล่อนเข้มข้น เจลลี่เมล่อน เป็นต้น

การแปรรูปเมล่อนเป็นผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปที่มีความสำคัญ ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเมล่อนและเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ให้เพิ่มสูงขึ้น ในปัจจุบันสัดส่วนการบริโภคและตลาดร้อยละ 99 เป็นการบริโภคภายในประเทศ และส่งออกเพียงร้อยละ 1 ซึ่งการส่งออกส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์เมล่อนแปรรูป แต่เนื่องจากศักยภาพการผลิตเมล่อนในประเทศไทยมีคุณภาพเทียบเท่าประเทศคู่แข่ง เช่น ญี่ปุ่น จีน และความต้องการบริโภคผลิตภัณฑ์ผลไม้แปรรูปในต่างประเทศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นอุตสาหกรรมเมล่อนจึงเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความน่าสนใจและควรสนับสนุนส่งเสริมเพิ่มโอกาสทางการค้า เพื่อรองรับการเติบโตด้านเศรษฐกิจในอนาคต และเพื่อเตรียมพร้อมการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ ลดขีดจำกัดทางการค้า เพิ่มศักยภาพในการแข่งขัน รวมถึงการสร้างความน่าเชื่อถือให้แก่ผลิตภัณฑ์ จึงควรให้ความสำคัญกับการผลิตสินค้าที่คำนึงถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากหลายประเทศให้ความสนใจกับสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นเนื่องจากปัญหาทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด สวนทางกับจำนวนประชากร ความต้องการการบริโภค รวมถึงการขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการคำนึงถึงกรรมวิธีการผลิตและการใช้ทรัพยากรเพื่อผลิตสินค้าจึงเข้ามามีบทบาทในการตัดสินใจเลือกซื้อของผู้บริโภค เช่น สหภาพยุโรปมีข้อกำหนดในการนำเข้าสินค้าทางสิ่งแวดล้อม รวมถึงองค์การการค้าโลก (WTO) ได้กำหนดข้อบังคับทางการค้ากับสินค้าบางประเภท ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาและข้อกีดกันทางการค้าที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต รวมถึงการเพิ่มศักยภาพให้ผลผลิต และคำนึงถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ประเทศไทยจึงควรตระหนักและดำเนินการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับสินค้าและผลิตภัณฑ์ โดยใช้หลักการการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นรูปแบบการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง กระบวนการผลิต การกระจายสินค้า การใช้งานของผู้บริโภค ตลอดจนการกำจัดซาก ด้วยการประเมินร่องรอยการใช้น้ำ เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ (รมณี, 2555) ซึ่งจากผลการประเมินทางสิ่งแวดล้อม ผู้ผลิตจะทราบถึงสถานะทางสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ นำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการผลิต การบริหารและจัดการ

ทรัพยากรที่ใช้ในการผลิต การลดปริมาณการใช้น้ำตลอดโซ่อุปทาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ใช้เป็นเครื่องมือเพื่อประเมินปริมาณการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วในจังหวัดจันทบุรี เพื่อวิเคราะห์กระบวนการใช้น้ำตลอดวัฏจักร เพื่อพัฒนาปรับปรุงผลิตภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเมล่อนให้ยั่งยืน ส่งเสริมผลิตภัณฑ์ให้มีคุณค่าทางด้านสิ่งแวดล้อม รวมถึงการเพิ่มศักยภาพและขีดความสามารถด้านการแข่งขันไปสู่ตลาดสากล

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์

1. บีกเกอร์วัดปริมาตรน้ำขนาดมาตรฐาน
2. โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Office Excel 2013
3. โปรแกรมสำเร็จรูป Sigma Pro 7.1

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ข้อมูลปฐมภูมิ ได้จากการเก็บรวบรวมจากการสอบถามข้อมูลจากเกษตรกรผู้เพาะปลูกและผู้ประกอบการ รวมถึงวัดค่าจริงจากหน้างาน ด้วยตารางแผ่นรวบรวมข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม โดยศึกษาจากตัวแทนโรงงานเมล่อนลอยแก้วที่มีอัตราการผลิตสูงที่สุดในจังหวัดจันทบุรี

2. ข้อมูลทุติยภูมิ อ้างอิงข้อมูลการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการประเมินร่องรอยการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ จากโปรแกรม Sigma Pro 7.1 และฐานข้อมูลงานวิจัยจากสถาบันต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ดำเนินการวิจัยยึดตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพจากโรงงานเมล่อนลอยแก้ว ตามขั้นตอนกระบวนการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ดังนี้

การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (Goal and Scope Definition)

เป้าหมายของการศึกษา คือ เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเชิงปริมาณตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้ว ในหน่วยหน้าที่ (Functional Unit) เพื่อการบริโภคและแปรรูป 1 ถุง น้ำหนักสุทธิ 2,000 กรัม โดยมีขอบเขตของระบบ (System Boundaries) เป็นการประเมินแบบ Cradle-to-Gate (business-to- business: B2B) คลอบคลุมตลอด 3 กระบวนการตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบเมล่อนผลสด การขนส่ง จนถึงกระบวนการผลิต เพื่อทราบถึงสถานะผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้วัตถุดิบ ทรัพยากร และการปล่อยของเสียทางสิ่งแวดล้อม (Figure1)

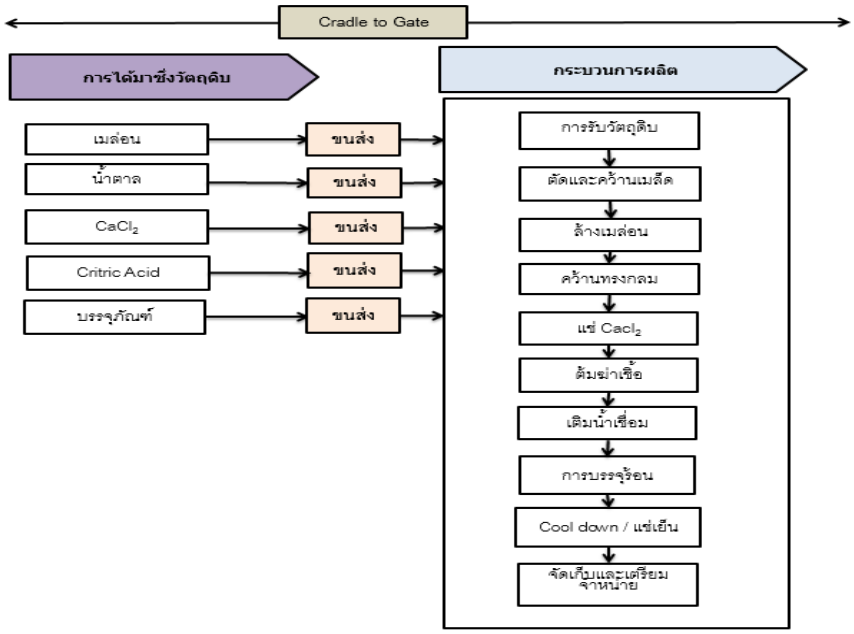


Figure1 Life Cycle Assessment of Melon in light syrup in boundaries B2B

การจัดทำบัญชีรายการ (Inventory Analysis)

การจัดทำรายการสารขาเข้าและสารขาออกของการได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบเมล่อนผลสด การขนส่งวัตถุดิบมายังโรงงาน และกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ สำหรับการเก็บข้อมูลในกระบวนการผลิตพิจารณาตามกระบวนการย่อยทุกกระบวนการ โดยสารขาเข้าพิจารณารวมถึงวัตถุดิบ ทรัพยากรและพลังงาน รวมถึงระบบและวัสดุช่วยการผลิต สำหรับสารขาออกจะพิจารณารวมถึงผลิตภัณฑ์หลัก ผลิตภัณฑ์ร่วม ของเสียและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้การปันส่วนตามน้ำหนัก (Mass Allocation) เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วเท่านั้น (Figure2)

Raw material	Unit	Quantity
Melon	kg	7,784.00
calcium chloride	kg	0.81
Sugar	kg	612.72
Critic Acid	kg	23.19
Water	m^3	47.17
Plastic Bag (PP)	kg	3.11
Electricity	kwh	1397.15
LPG	kg	173

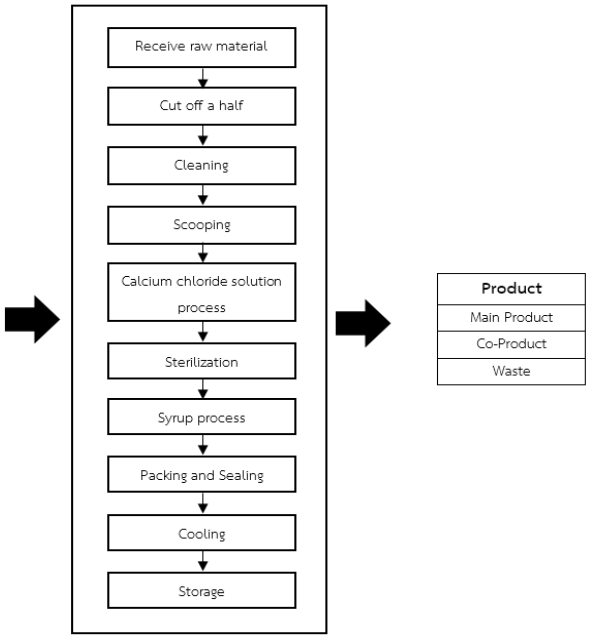


Figure 2 Input and Output in manufacturing of Melon in light syrup process

การประเมินผลกระทบ (Life Cycle Impact Assessment : LCIA)

การประเมินปริมาณร่องรอยการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้ว จากข้อมูลบัญชีรายการทางสิ่งแวดล้อมที่จัดทำขึ้น โดยคำนวณออกมาในรูปของปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้ว 1 ถุง น้ำหนัก 2,000 กรัม ด้วยหลักการปริมาณสารที่ใช้หรือของเสียที่ถูกปล่อยคูณค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม หรือคำนวณให้อยู่ในรูปปริมาณการใช้น้ำสีเขียว (Green water) น้ำสีฟ้า (Blue water) และน้ำสีเทา (Grey) ของในแต่ละกิจกรรมเทียบเท่าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ และนำไปคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (Emission factor) เพื่อเป็นการเตรียมข้อมูลสำหรับการแปลผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา (Hoekstra and Hung, 2005)

โดย น้ำสีเขียว คือ ปริมาณน้ำฝน (ตัวชี้วัดปริมาณการบริโภคน้ำฝน)
น้ำสีฟ้า คือ น้ำผิวดิน (ตัวชี้วัดการใช้น้ำเพื่อการบริโภค)
น้ำสีเทา คือ ปริมาณน้ำที่บำบัดน้ำเสีย (ตัวชี้วัดระดับของมลพิษทางน้ำ)

การประเมินผลกระทบจากร่องรอยการใช้น้ำ คำนวณได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$WFP = WFP_{\text{การได้มาซึ่งวัตถุดิบ}} + WFP_{\text{การผลิต}} + WFP_{\text{การนส่ง}} \quad (1)$$

$$WFP_i = \text{ผลรวมของ } (Q_i \times EF_i) \quad (2)$$

โดยที่

WFP คือ Water Footprint ของผลิตภัณฑ์มีหน่วยเป็นลิตร (L) หรือ ลูกบาศก์เมตร (m^3)

WFP_i คือ ค่า Water Footprint ของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงวัฏจักรชีวิตมีหน่วยเป็น ลิตร (L) หรือ ลูกบาศก์เมตร (m^3)

Q_i คือ ปริมาณวัตถุดิบ ทรัพยากรและวัสดุช่วยผลิต มีหน่วยเชิงกายภาพ

EF_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ หรือปริมาณการใช้น้ำของแต่ละสาร i ซึ่งประกอบด้วย EF_{blue}, EF_{green} และ EF_{gray}มีหน่วยเป็น ปริมาตรน้ำที่ใช้ต่อหน่วยของรายการสาร

ตัวอย่างการคำนวณร่องรอยการใช้น้ำสีเขียวจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบในส่วนของวัตถุดิบ

$$WFP_{\text{การได้มาซึ่งวัตถุดิบ}} = WFP_{Melon} + WFP_{Calcium\ Chloride} + WFP_{Sugar} + WFP_{Citric\ acid} + WFP_{Plastic\ pp} \quad (3)$$

จากข้อมูล ปริมาณต่อผลิตภัณฑ์ของวัตถุดิบเมล่อน 5.5127 กิโลกรัม
การปันส่วน (%) 17.41 เปอร์เซ็นต์
ค่า Emission Factor น้ำสีเขียว(EF_{green}) 0.0005 $m^3\ H_2O$/หน่วย

จากสมการที่ 2 WFP_{Melon} = (5.5127 x0.17410) x.0005 = 0.0005 $m^3\ H_2O$

คำนวณ WFP_i เช่นเดียวกับ WFP_{Melon} และแทนค่าในสมการที่ 3 จะได้

$WFP_{\text{การได้มาซึ่งวัตถุดิบ}}$ = 0.0005 + 0 + 0.5099 + 0+ 0 = 0.51038 $m^3\ H_2O$

= 510.38 L H_2O

ดังนั้น จากการประเมินร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้ว 1 ถุง มีการใช้น้ำสีเขียว 510.38 ลิตร ในกระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ

การแปรผล (Interpretation)

การแปรผลจากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่ได้คำนวณและจัดทำขึ้น ทำให้ทราบถึงสถานะของกระบวนการที่ส่งผลให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เพื่อนำไปสู่แนวทางการวิเคราะห์และวิธีการปรับปรุงกระบวนการให้เกิดประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วในจังหวัดจันทบุรี

จากผลการศึกษาค่าร่องรอยการใช้น้ำของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์พบว่าการได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วบรรจุถุงพลาสติก 1 ถุง น้ำหนักสุทธิ 2,000 กรัม ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่งและกระบวนการผลิต มีการใช้น้ำทั้งสิ้น 688.86 ลิตร (L H_2O) (Table1)

Table 1 Water Footprint of Melon in Syrup

Life Cycle	Water Footprint Total (L H_2O)				%
	Green	Blue	Grey	Total	
Raw material	510.38	107.06	67.26	684.70	99.40%
Manufacturing	0.16	3.98	0.02	4.16	0.60%
Total	510.53	111.05	67.28	688.86	100.00%

โดยค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำผลิตภัณฑ์ของการได้มาซึ่งวัตถุดิบ 684.70 ลิตร คิดเป็นร้อยละ 99.40% ของค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด และเมื่อพิจารณาที่ประเภทของน้ำจะพบว่าการได้มาซึ่งวัตถุดิบมีปริมาณน้ำสีเขียว 510.38 ลิตร น้ำสีฟ้า 107.06 ลิตร และน้ำสีเทา 67.26 ลิตร โดยผลกระทบส่วนใหญ่มาจากการได้มาซึ่งน้ำตาล นอกจากนั้นเป็นค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิต 4.16 ลิตร โดยส่วนใหญ่เป็นน้ำที่ใช้ในกระบวนการต้มฆ่าเชื้อและกระบวนการทำให้เย็นตัว สำหรับการได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์เมล่อนผลสด 1 กิโลกรัม มีการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตทั้งสิ้น 38.12 ลิตร (L H_2O) (Table 2)

Table 2 Water Footprint of Fresh Melon

Life Cycle	Water Footprint Total (L H_2O)				%
	Green	Blue	Grey	Total	
Raw material	0.53	0.39	0.00	0.92	2.41%
Cultivation process	0.00	37.20	0.00	37.20	97.56%
Distribution	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%
Customer	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%
Waste management	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02%
Total	0.53	37.59	0.00	38.12	100.00%

โดยเป็นค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำในกระบวนการเพาะปลูก 37.20 ลิตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 97.56 ของค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำทั้งหมด เมื่อพิจารณาที่ประเภทของน้ำจะพบว่ากระบวนการเพาะปลูกมีปริมาณน้ำสีฟ้า 37.20 ลิตร โดยผลกระทบส่วนใหญ่มาจากการน้ำซึ่งใช้ในการเพาะปลูกซึ่งเป็นน้ำจากระบบชลประทาน นอกจากนั้นเป็นค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ 0.92 ลิตร และขั้นตอนการกำจัดซาก 0.01 ลิตร

ซึ่งหากเปรียบเทียบค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำของเมล่อนผลสด 1 กิโลกรัม เทียบกับค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำของพืชในตระกูลเดียวกันอย่างเช่น แตงโม ซึ่งมีค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำรวมทั้งสิ้น 235 ลิตร (L H_2O) (Mekonne and Hoekstra, 2010) ดังตาราง (Table 3)

Table 3 Compered Water footprint result

Type	Water Footprint Total (L H_2O.eq)			
	Green	Blue	Grey	Total
Watermelon	147	25	63	235
Melon	0.53	37.59	0.00	38.12

จากกาการเปรียบเทียบค่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำของแตงโมและเมล่อน จะเห็นได้ว่าแตงโมมีปริมาณร่องรอยการใช้น้ำในการเพาะปลูกทั้งหมด 235 ลิตรเทียบเท่า คิดเป็น 6 เท่าของเมล่อน ซึ่งมีปริมาณร่องรอยการใช้น้ำในการเพาะปลูก 38.12 ลิตรเทียบเท่า

สรุป

จากค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้ว พบว่าปริมาณร่องรอยการใช้น้ำมีปริมาณเท่ากับ 688.86 ลิตร (L H_2O) ซึ่งทำให้ผู้ประกอบการสามารถทราบถึงขั้นตอนหรือกระบวนการที่เกินความจำเป็นและส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม หากทางโรงงานสามารถปรับปรุงแก้ไข ลดปริมาณการใช้ หรือ ลดขั้นตอนกระบวนการที่ใช้ทรัพยากรน้ำเกินความจำเป็น ยังสามารถช่วยให้ผู้ประกอบการลดต้นทุนการผลิตรวมถึงสร้างภาพลักษณ์ที่ดีแก่ผู้ประกอบการทางการแข่งขันกับตลาดโลก และเป็นแนวทางในการพัฒนาอุตสาหกรรมเมล่อนของประเทศให้เกิดประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณเกษตรผู้เพาะปลูกเมล่อนในจังหวัดฉะเชิงเทรา ผู้ประกอบการโรงงานแปรรูปเมล่อนในจังหวัดจันทบุรี ที่ให้การสนับสนุนและข้อมูลประกอบการทำงานวิจัย รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ปุณณมี สัจจกมล ที่ให้การสนับสนุนให้คำแนะนำและคำปรึกษาตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

รมณี วังเมือง. 2555. **การศึกษาปริมาณการใช้น้ำโดยวิธีร่องรอยการใช้น้ำและการประเมินวัฏจักรชีวิต กรณีศึกษาแป้งข้าว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. **ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร**. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th, 1 ตุลาคม 2558.

ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. 2557. **ข้อมูลรายงานภาวะการผลิตพืช**. แหล่งที่มา: http://production.doae.go.th/report, 3 ตุลาคม .2558

Hoekstra, A. Y. and P.Q. Hung. 2005. **Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade**. Global Environmental Change 15: 45-56.

Mekonnen, M.M and Hoekstra, A.Y. 2010. **The green, bule and grey water footprint of crops and derived crops products**. Value of water research report series No.47, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.

การศึกษาการเปรียบเทียบระบบจำหน่ายไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อลดความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมด

Comparing the distribution of electrical system at the industrial factory to reduce cost and losses of transformers by using Total Ownership Cost Analysis Technique

วิชัย สุระพัฒน์[1] **รัญชน์ อมดวง**[1*] และ นพดล คะเตปะนานนท์[1]

Vichai Surapat[1] , **Runch Omdoung**[1*] and Noppadon Katepananon[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการวางแผนระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโรงงานอุตสาหกรรมสองแบบ ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น มูลค่าซื้อขายของหม้อแปลงไฟฟ้า อัตราดอกเบี้ย ค่าความสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลง ค่าความสูญเสียแบบมีภาระ จึงนำรูปแบบจำลองการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า 2 แบบสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมนำมาคำนวณหาระบบจำหน่ายที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด บทความนี้จะอธิบายการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดของหม้อแปลงระบบจำหน่ายทั้ง 2 แบบด้วยวิธีหาค่าความเป็นเจ้าของทั้งหมดด้วยรูปแบบการใช้ไฟฟ้าแบบอัตราค่าไฟฟ้าที่แตกต่างกันตามช่วงเวลาของการใช้ไฟฟ้า

ABSTRACT

This article presents a comparison between the planning of electric power distribution system, with two type of factories, where there are many factors that affect expenses throughout the life cycle of the transformer, such as the value of the interest rate, no-load loss and load loss of transformer. There are 2 models, for example, the installation of 2 transformers for industrial to determine the best distribution system. This article will explain to calculate the total cost of the 2 distribution transformer model with a total ownership cost technique with time of use rates (TOU).

Key words: Total ownership cost, Transformer, Industrial

*Corresponding author; e-mail address: **runch_wing@hotmail.com**

---

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ.งามวงศ์วาน เขต จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Road Chatuchak Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันมีการก่อสร้างโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย การออกแบบระบบจำหน่ายไฟฟ้าของผู้ประกอบการจึงจำเป็นที่จะต้องวางแผนเพื่อที่จะทำให้ผู้ประกอบการลดค่าใช้จ่ายในส่วนของความสูญเสียในระบบให้มากที่สุด สามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด

บทความนี้จึงได้ทำการศึกษาการคำนวณค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัวที่ต่ออยู่ในระบบ เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายจากค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยทำการศึกษาค่าใช้จ่ายทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าตัวอย่างทั้งสองแบบเพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบให้เห็นค่าใช้จ่ายของความสูญเสียในระบบ เพื่อให้มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากที่สุด

โดยจะทำการคำนวณถึงมูลค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์และค่าความสูญเสียของหม้อแปลงภายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสองรูปแบบด้วยอัตราค่าไฟฟ้า TOU และนำมาเปรียบเทียบกัน ว่าแบบไหนมีความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งมากที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์การทำงาน

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ Laptop
2. โปรแกรม Microsoft Excel

นำแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมสองแบบมาวิเคราะห์ และรวบรวมข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งหมดจากผู้ผลิตเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณด้วยวิธีหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดแสดงให้เห็นใน Table 1

Table 1 Transformers Technical Specifications

Transformer	Size (kVA)	Bid price (Baht)	No Load losses (kW)	Load Losses (kW)
A1	6000	2,550,000.00	5.2	48
B1	2500	1,400,000.00	3	28
C1	2000	1,050,000.00	2.5	23
A2	1500	850,000.00	2.2	18
B2	2500	1,500,000.00	3.2	28
C2	2000	1,100,000.00	2.6	23

รูปแบบที่ 1 และ 2 ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมแสดงให้เห็นใน ภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยรูปแบบที่ 1 ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า B1, C1 จะรับแรงดัน 6.9 kV จากหม้อแปลง A1 และในรูปแบบที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้า A2, B2, C2 จะรับแรงดัน 22 kV โดยตรงจากระบบจำหน่าย

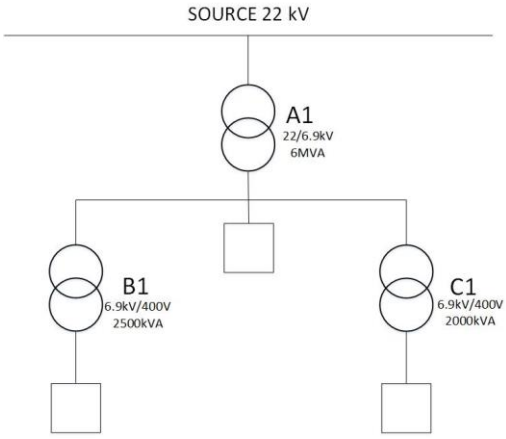


Figure 1 Distribution system model 1

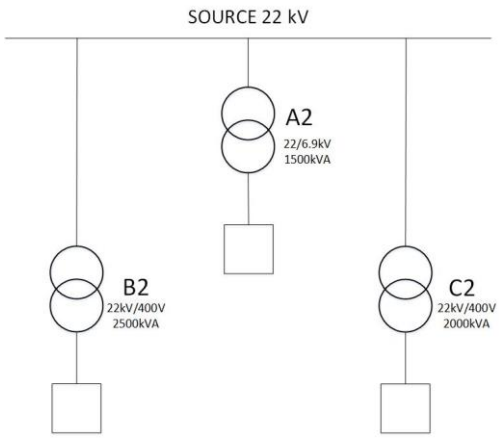


Figure 2 Distribution system model 2

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้า คือผลรวมของราคาหม้อแปลงไฟฟ้าและค่าความสูญเสียทางไฟฟ้า ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าคามสูญเสียทางเทคนิคสองแบบคือ ค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก และค่าความสูญเสียในขดลวด(Paul, 1984) โดยการคำนวณด้วยวิธีการหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดนี้ ถูกกำหนดค่าใช้จ่ายต่อวัตต์ (บาท/วัตต์) สำหรับค่าความสูญเสียทั้งสองแบบ ค่าใช้จ่ายต่อวัตต์สำหรับค่าความสูญเสียแบบไม่มีภาระถูกกำหนดด้วยตัวแปร A และค่าใช้จ่ายต่อวัตต์สำหรับค่าความสูญเสียแบบมีภาระถูกกำหนดด้วยตัวแปร B

วิธีคำนวณค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดนั้น ขึ้นอยู่กับต้นทุนที่เพิ่มขึ้นทั้งหมดในการเป็นเจ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า ประกอบด้วยต้นทุนของหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าทั้งสองแบบ อัตราเงินเฟ้อที่เพิ่มขึ้น (Troy, 2015) ค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และรวมถึงค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นด้วย

ค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมด (Total Ownership Cost : TOC) คำนวณจากสมการ

$$TOC = BP + (A \times NL + B \times LL) \tag{1}$$

โดยบทความนี้จะคำนวณในรูปแบบการใช้ไฟฟ้าแบบอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use : TOU)

$$TOC = BP + [(A_p \times NL) + (A_{op} \times NL)] + [(B_p \times LL) + (B_{op} \times LL)]$$

โดยที่

$$A_p = \frac{(DC' + (H_p \times EC_p'))}{(FCR \times 1000)} \tag{2}$$

$$A_{op} = \frac{(DC' + (H_{op} \times EC_{op}'))}{(FCR \times 1000)} \tag{3}$$

$$B_p = \frac{((PL^2 \times RF \times DC') + (PL^2 \times H_p \times LSF \times EC'_p))}{(FCR \times 1000)} \quad (4)$$

$$B_{op} = \frac{((PL^2 \times RF \times DC') + (PL^2 \times H_{op} \times LSF \times EC'_{op}))}{(FCR \times 1000)} \quad (5)$$

โดยค่า A_p, A_{op}, B_p, B_{op} ในการอยู่ในหน่วย บาทต่อวัตต์

ตัวแปรต่อไปนี้จะเป็นตัวแปรที่ใช้ในสมการหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมด ค่าที่ใช้จะใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัวในระบบ

- Fixed Charge Rate (FCR) : คือค่าใช้จ่ายที่คำนวณได้ต่อปีของหม้อแปลงไฟฟ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วย ภาษี ค่าเสื่อมราคา อัตราค่าซ่อมบำรุง ในที่นี้ กำหนดให้เท่ากับ 15%
- Bid Price (BP) : ราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า
- $Watts_{NL}$ (NL) : ค่าความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าแบบไม่มีภาระในหน่วยวัตต์ ในสมการนี้ค่าใช้จ่ายต่อวัตต์จะอยู่ในรูปตัวแปร A_p สำหรับช่วง peak และ A_{op} สำหรับช่วง off-peak
- $Watts_{LL}$ (LL) : ค่าความสูญเสียพลังงานไฟฟ้าแบบมีภาระในหน่วยวัตต์ ในสมการนี้ค่าใช้จ่ายต่อวัตต์จะอยู่ในรูปตัวแปร B_p สำหรับช่วง peak และ B_{op} สำหรับช่วง off-peak
- Peak Hours Per Year (H_p) : จำนวนชั่วโมงการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วง peak ต่อปี ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับวันละ 16 ชั่วโมง หรือ 5840 ชั่วโมงต่อปี
- Off Peak Hours Per Year (H_{op}) : จำนวนชั่วโมงการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วง peak ต่อปี ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับวันละ 8 ชั่วโมง หรือ 2920 ชั่วโมงต่อปี
- Demand Charge (DC) : ค่าความต้องการไฟฟ้ากำหนดโดย กฟภ. ในที่นี้กำหนดให้ใช้ในหน่วยบาทต่อกิโลวัตต์ต่อปีโดย DC ที่เดิมเป็นค่าที่ใช้รายเดือนจึงต้องคูณด้วย 12 เพื่อแปลงให้เป็นรายปี
- Energy Cost (EC) : ราคาค่าไฟฟ้าในหน่วย บาท/kWh สำหรับตลอดทั้งอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งเป็นช่วง peak load และ off-peak load
- Peak Load (PL) : การประมาณของโหลดสูงสุดประจำปีหม้อแปลงไฟฟ้าจริงโดยสันนิษฐานว่าโหลดสูงสุดจะเติบโตในอัตราคงที่คิดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ โดยค่าที่เพิ่มขึ้นนี้จะถูกใช้ในการคำนวณทั้งอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า $(PL)^2$ ถูกใช้ในการคำนวณในสมการมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$(PL)^2 = \frac{(PL_I)^2[(1+i)^n - (1+g)^{2n}]}{(1+i)^n[(1+i) - (1+g)^2]} \times CRF_n \quad (6)$$

PL_I : โหลดสูงสุดจากการคาดการณ์ในช่วงปีแรกของการติดตั้ง

g : เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของโหลดสูงสุดต่อปีตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

i : อัตราเฉลี่ยของดอกเบี้ยเงินกู้

n : ระยะเวลาตลอดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ในบทความนี้กำหนดที่ 20 ปี

CRF_n : การคำนวณจำนวนเงินเป็นรายเดือนหรือรายปี ตามระยะเวลาและอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี้

$$CRF_n = \frac{i(1+1)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{7}$$

Peak Loss Responsibility Factor (RF) : คืออัตราส่วนที่แตกต่างระหว่างโหลดสูงสุดที่ตัวหม้อแปลงไฟฟ้าและโหลดสูงสุดที่ระบบไฟฟ้า

$$RF = \left(\frac{Transformer\ load\ at\ time\ of\ system\ peak}{Transformer\ Peak\ load} \right)^2 \tag{8}$$

Loss Factor (LSF) : ค่า Loss Factor นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า Load Factor แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยการทดสอบของโหลดทางไฟฟ้าเราจะพบความสัมพันธ์ของทั้ง 2 แฟคเตอร์ดังสมการนี้

$$LSF = 0.2 \times (Load\ Factor) + 0.8 \times (Load\ Factor)^2 \tag{9}$$

วิธีการหนึ่งในการจัดการอัตราเงินเฟ้อ คือ เพิ่มต้นทุนผันแปรในอนาคต เช่นต้นทุนของการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า โดยหาค่าร้อยละแสดงเป็นอัตราเงินเฟ้อโดยทั่วไป สำหรับการคำนวณตัวแปร A และ B สมการต่อไปนี้เป็นการคำนวณการเพิ่มขึ้นจากอัตราเงินเฟ้อ(Troy, 2015)

$$A_p' = A_p \times X \times \frac{(1 - X^n)}{(1 - X)} \times CRF_n \tag{10}$$

โดยที่

X = การปรับปรุงอัตราเงินเฟ้อ $\frac{(1+r')}{(1+i)}$ สำหรับ $r' \neq 1$

A_p' = ค่าหลังจากปรับปรุงอัตราเงินเฟ้อ A_p = ค่าก่อนปรับปรุงอัตราเงินเฟ้อ

n = จำนวนปีที่นำมาคำนวณ i = อัตราเฉลี่ยของการจ่ายดอกเบี้ยเงินกู้

p = อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานต่อปีเป็นเปอร์เซ็นต์

ig = อัตราเงินเฟ้อต่อปีเป็นเปอร์เซ็นต์ r' = อัตราเงินเฟ้อสมมูล

$$r' = \frac{(1+P)}{(1+ig)} - 1 \text{ สำหรับ } P \geq ig \tag{11}$$

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

Table 2 Input data

Input Data	Values	Input Data	Values
FCR (Fix Charge Rate) (%)	15%	ig (General Inflation Rate)(%)	2%
RF (Peak Loss Responsibility Factor)	0.81	DC (Baht/kW-year)	1595.16
g (Load Demand Growth)(%)	4.23%	EC at peak (Baht/kWh)	4.2097
I (Interest Rate)(%)	7%	EC at off peak (Baht/kWh)	2.6295
n (Study period)(Year)	20	Hours at peak (hr)	5840
lf (Load Factor)(%)	0.7	Hours at off peak (hr)	2920
p (Energy escalation rate)	2.30%		

นำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณใน Microsoft Excel และนำผลมาแสดงเป็นกราฟของค่าใช้จ่ายทั้งหมดโดยค่าไฟฟ้าแบบ TOU ที่นำมาใช้ในการคำนวณ จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 2558

ผลการทดลองและวิจารณ์

Table 3 Results from calculation

Transformer	Bid price(Baht)	Cost of LL(Baht)	Cost of NLL(Baht)	TOC(Baht)
A1	2,550,000.00	7,470,542.77	1,259,594.12	11,280,136.89
B1	1,400,000.00	4,357,816.62	726,688.91	6,484,505.53
C1	1,050,000.00	3,579,635.08	605,574.09	5,235,209.17
Sum of Model 1	5,000,000.00	15,407,994.47	2,591,857.12	22,999,851.59
A2	850,000.00	2,801,453.54	532,905.20	4,184,358.74
B2	1,500,000.00	4,357,816.62	775,134.84	6,632,951.46
C2	1,100,000.00	3,579,635.08	629,797.06	5,309,432.14
Sum of Model 2	3,450,000.00	10,738,905.23	1,937,837.10	16,126,742.33

จากการคำนวณข้างต้น แสดงให้เห็นค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปีของหม้อแปลงไฟฟ้าในทั้งสองรูปแบบโดยแบบที่ 1 มีค่าใช้จ่ายทั้งหมดอยู่ที่ 22,999,851.59 บาท และแบบที่ 2 มีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 16,126,742.33 บาท ซึ่งมีความแตกต่างกันถึง 29.83%

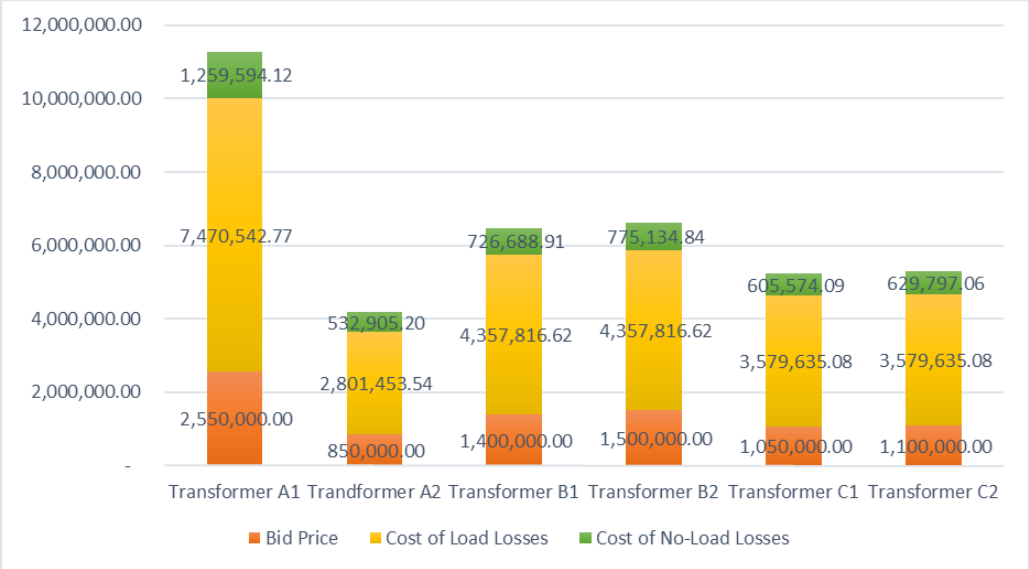


Figure 3 Cost results for every transformers from table 3

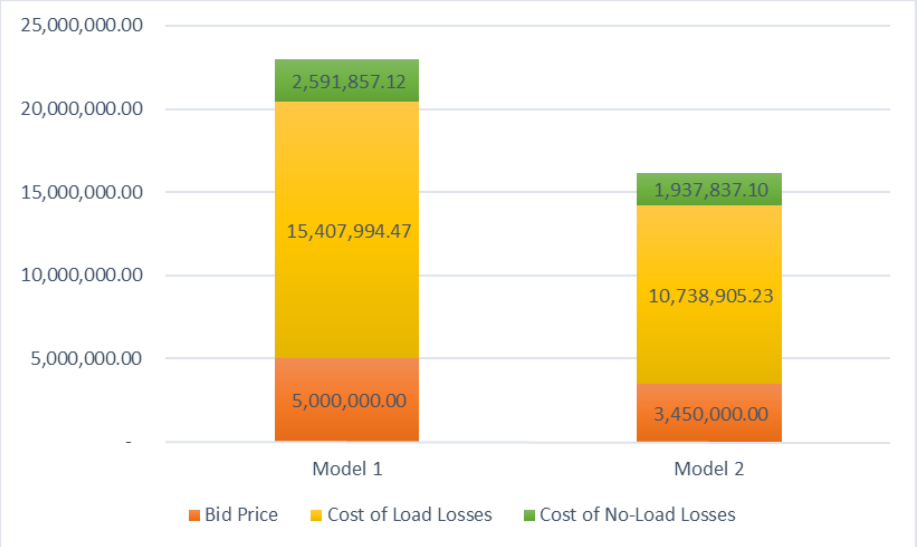


Figure 4 Cost results for 2 models from table 3

รูปที่ 3 แสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดของหม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัวที่นำมาคำนวณในระยะเวลา 20 ปี และรูปที่ 4 แสดงค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดของระบบจำหน่ายทั้ง 2 รูปแบบในระยะเวลา 20 ปี โดยที่หม้อแปลงไฟฟ้า B1 และ B2 จะมีค่าความสูญเสียแบบมีโหลดเท่ากัน แต่ค่าความสูญเสียแบบไม่มีโหลด B2 จะ มีค่าสูงกว่า และที่หม้อแปลงไฟฟ้า C1 และ C2 จะมีค่าความสูญเสียแบบมีโหลดเท่ากัน แต่ค่าความสูญเสียแบบไม่มีโหลด C2 จะ มีค่าสูงกว่า เมื่อมองภาพรวมรูปแบบที่สองจะมีค่าใช้จ่ายจากความสูญเสียน้อยกว่ารูปแบบที่หนึ่ง

สรุป

การคำนวณด้วยวิธีหาค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของทั้งหมดนั้น ควรใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าทุกตัวที่มีอยู่ในระบบ โดยระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีค่าใช้จ่ายในการเป็นเจ้าของรวมต่ำที่สุดจะเป็นการลงทุนตลอดอายุการใช้งานที่คุ้มค่าที่สุด ผลจากการวิเคราะห์รูปแบบที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีวิธีการประเมินผลที่คำนึงถึงพลังงานที่สูญเสีย และการผันผวนของค่าเงินรายปีที่ต้องพิจารณาในการจัดซื้อของหม้อแปลงไฟฟ้า และรูปแบบการใช้ไฟฟ้าซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอการคำนวณการใช้ไฟฟ้าแบบ TOU แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งานในอนาคตเช่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ไฟฟ้า จึงต้องพิจารณาเงื่อนไขเพิ่มเติมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ถิรไทย จำกัด (มหาชน) สำหรับข้อมูลทางเทคนิคของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณอาจารย์และนักวิจัยโครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลังสำหรับคำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

โครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง. 2557. **งานศึกษาความเหมาะสมโครงการเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าในพื้นที่ภาคใต้ จาก 33 เควี เป็น 22 เควี**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

Eleftherios I. Amoiralis, Marina A. Tsili, Antonios G. Kladas. 2010. Economic Evaluation of Transformer Selection in Electrical Power System. **XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010** .Rome, Italy.

Paul R. Rasmusson. 1984. Transformer Economic Evaluation. **IEEE Transactions on Industry Application, Vol. IA-20, No.2.** 355-363

Troy Knutson, P.E. 2015. Conducting Distribution Transformer Evaluations Using the Total Ownership Cost Method. **2015 IEEE Electric Power Conference**. 97-102.

การศึกษาการเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน ด้วยวิธีการทดสอบแบบระนาบเอียง

A Study of Tracking on Insulating Surface with an Inclined Plane Test

จิรวดี กัลยาเรือน[1*] และ วินัย พฤกษะวัน[1]

Jirawadee Kanlayaruan[1*] and Winai Plueksawan[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลลัพธ์จากพฤติกรรมของดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนบนผิวฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยผลจากการกระทำของดิสชาร์จไฟฟ้านั้น เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวฉนวน คือ การเกิดรอยไหม้ (Tracking) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวนที่อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60587 Method 1 (Third edition 2007-05) ซึ่งได้ทำการทดสอบวัสดุฉนวนชนิดต่างๆ โดยวางไว้บนแผ่นเอียง 45° ที่ต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้า และใช้สารละลายปนเปื้อนแอมโมเนียมคลอไรด์ หยดไหลผ่านบนผิวฉนวน จากนั้นทำการจ่ายแรงดันทดสอบ ดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนจะเกิดขึ้นบนผิวฉนวน และเกิดเป็นรอยไหม้ในที่สุด ดัชนีชี้วัดความคงทนของผิวฉนวนขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ยาวนานในการเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน (Tracking) ผลการทดสอบที่ได้ถูกจัดเก็บเป็นข้อมูลเพื่อนำมาอ้างอิงและเปรียบเทียบดัชนีความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ของวัสดุฉนวนที่จะนำไปใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

Abstract

This paper describes a study of partial discharges on insulating surfaces, causing tracking. The tests were conducted according to the standard IEC 60587 Method 1. Test samples of insulating materials were laid on an inclined plane at 45° from the horizon. Both ends of the test samples were covered with aluminium electrodes and connected to electrical circuit as stated in the standard. Solution of ammonium chloride as contaminant was dropped on the material's surface at the rate specified in the standard, and then 6kV of voltage was applied until surface tracking occurred. The obtained results were the tracking index of the tested materials and were stored as data to be used as references for insulating materials in HV system further.

Key Words: partial discharge, tracking, contaminated solution, flow rate

*Corresponding author ; e-mail address: **pakwan_ee05@hotmail.com**

[1] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

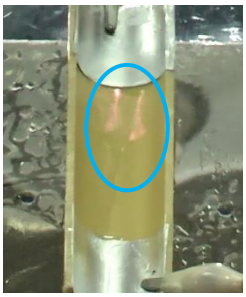
[1] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

คำนำ

อุปกรณ์ทางไฟฟ้ากำลังต่างๆ ที่ใช้งานบริเวณนอกอาคาร ที่ประกอบด้วยวัสดุฉนวน เช่น สายส่ง ลูกถ้วย เป็นต้น ล้วนได้รับผลกระทบจากมลภาวะเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ความเสียหายของฉนวนจะเกิดจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนบนผิวฉนวนและนำไปสู่การเกิดรอยไหม้ทางไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้าในที่สุด ในการศึกษานี้จะพิจารณาเฉพาะฉนวนไฟฟ้าประเภท ฉนวนแข็ง โดยทดสอบด้วยวิธี Inclined – Plane Tracking (IPT) Test เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้สารละลายสิ่งสกปรกและแผ่นเอียงในการทดสอบความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ของวัสดุ (อนงค์พันธุ์ และ วินัย, 2553) ซึ่งได้ถูกอธิบายในมาตรฐาน BS 5604; 1986 และ ASTM/D 2303 ; 1984 สำหรับมาตรฐาน IEC 60587 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธี Constant Tracking Voltage เป็นวิธีการทดสอบที่ทั้ง 2 มาตรฐานข้างต้นยอมรับและอ้างถึง การทดสอบใช้ค่าแรงดันที่คงที่ เพื่อให้ทราบว่าวัสดุฉนวนชนิดใด ใช้เวลาในการเกิด tracking ได้นานกว่ากัน ผลที่ได้จะเป็นดัชนีความคงทนของวัสดุฉนวนนั้นๆ

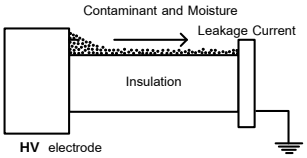
การเกิดรอยไหม้บนผิวฉนวน (Tracking)

ฉนวนที่ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่อยู่นอกอาคาร บริเวณผิวของฉนวนเป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรก ซึ่งสิ่งสกปรกเหล่านี้จะดูดซับความชื้นจากอากาศโดยรอบ ทำให้เกิดเป็นชั้นบางๆ ที่เปียกชื้นและนำไฟฟ้าบนผิวฉนวน (Hackam R, 1999) ดังนั้นกระแสจึงสามารถไหลในชั้นสกปรกบนผิวฉนวนระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับด้านที่ต่อลงดิน การสูญเสียความชื้นของผิวฉนวนโดยความร้อนของกระแสรั่วที่ไหลผ่าน ทำให้เกิดพื้นที่แห้งและเล็กมากเป็นแถบแห้ง (n – Dry Band) ในหลายบริเวณ เมื่อแถบแห้งเล็กๆ ได้ก่อตัวขึ้น การไหลของกระแสรั่วจึงถูกขัดขวาง เพราะเป็นค่าความต้านทานที่มีค่าสูงมาก ส่งผลให้ความเครียดทางไฟฟ้าคร่อมแถบแห้งดังกล่าวสูงตามไปด้วย จนทำให้อากาศบริเวณนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออน(Ionization) ทำให้อากาศกลายสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าจนมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดเส้นประกายไฟขึ้นที่บริเวณแถบแห้งที่กระจายอยู่ในหลายบริเวณบนผิวฉนวน เรียกเหตุการณ์นี้ว่า การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนบนผิวฉนวน (Gabe Paoletti and Alex Golubev, 1999) ดังภาพที่ 1

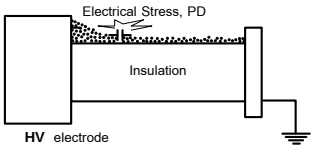


ภาพที่ 1 ลักษณะดิสชาร์จไฟฟ้าบนผิวฉนวน

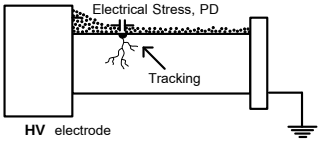
การเกิดดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนส่งผลให้พื้นที่นั้นมีความร้อนสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับความรุนแรงของดิสชาร์จ จนกระทั่งผิววัสดุไม่สามารถทนได้ จึงเกิดเป็นรอยไหม้ (Tracking) ขึ้นที่ผิว (A.S.G. Alghamdi *et al.*, 1996) ซึ่งรอยไหม้นี้มีส่วนประกอบของคาร์บอน ที่ช่วยให้เกิดการขยายตัวของรอยไหม้ การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ของผิวฉนวนโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นเมื่อส่วนตัวนำคาร์บอนได้ขยายตัวจนกระทั่งเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันกับดินหรือเมื่อฉนวนไม่สามารถทนต่อแรงดันนั้นได้อีก ดูภาพอธิบายภาพที่ 2 ภาพที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 2 ผิวฉนวนที่มีสิ่งสกปรกและความชื้น



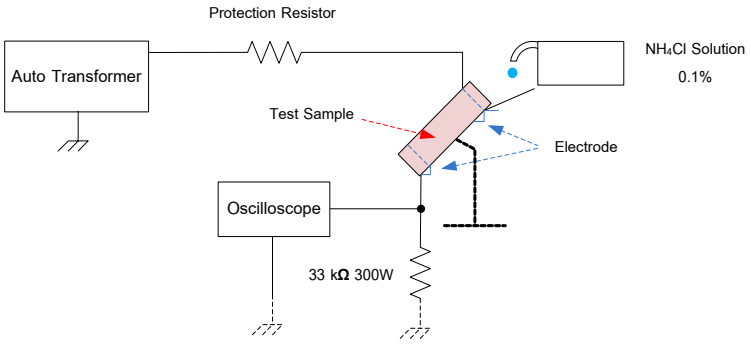
ภาพที่ 3 เมื่อความชื้นระเหยไปทำให้เกิด พื้นที่แห้งเล็กๆ ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง



ภาพที่ 4 เกิดรอยไหม้ขึ้นที่ผิวฉนวน

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดสอบจะใช้แผ่นสำหรับวางวัสดุทดสอบที่เอียงทำมุมกับแนวราบ 45° วัสดุทดสอบจะถูกหุ้มด้วยอิเล็กโทรดหัวท้าย แล้วต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าดังภาพที่ 5 โดยใช้สารละลาย NH_4Cl มีความเข้มข้น 0.1% หยดไหลผ่านอิเล็กโทรดด้านที่ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไปบนผิววัสดุทดสอบ ทำการป้อนค่าแรงดันคงที่ที่ 6 kV และปรับอัตราการหยดของสารละลาย 0.9 ml/min เมื่อเกิดรอยไหม้เป็นระยะทางประมาณ 1 นิ้ว (25 mm.) จึงบันทึกผลการทดสอบในปริมาณของชั่วโมงและนาที



ภาพที่ 5 การต่อวงจรสำหรับการทดสอบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับผิววัสดุฉนวน ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC, Cable Tray, ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC เคลือบด้วยสีฉนวนหม้อแปลง, ท่อร้อยสายไฟฟ้าPVC ชุบสี Jotun Hardtop AS เบอร์ 0038 Grey โดยชุบ 2 ชั้น เป็น two-pack polyurethane topcoat ซึ่งเป็นสีใช้ทาภายนอกสำหรับเรือ ห้องเครื่อง, PP และฉนวน Cross-link Polyethylene (XLPE) ของสายเคเบิลอากาศอลูมิเนียมแรงดัน 22 กิโลโวลต์ โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้น

ผลการทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC

ทดสอบที่แรงดัน 6 kV ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC

No.	ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC	
	Discharge time (min:sec)	Tracking time (hr:min:sec)
1	01:15	2:00:00
2	01:30	3:10:00
3	00:40	2:30:00
4	01:00	3:00:00
5	00:30	2:40:00
6	00:12	2:50:00
7	00:20	2:30:00
8	00:45	2:20:00
9	00:20	2:40:00
10	00:17	2:30:00
AVG	**00:41**	**2:37:00**

จากตารางที่ 1 ได้พบว่าหลังจากเริ่มการทดสอบเพียงชั่วครู่จะเริ่มเกิดเส้นประกายไฟดิสชาร์จไฟฟ้า โดยมีเวลาค่าเฉลี่ยที่ 41 วินาที และเมื่อยังคงปล่อยให้สารละลายไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง ไฟที่ลุกไหม้ภายในเนื้อฉนวนจะลุกลามพร้อมกับปรากฏรอยไหม้ที่ชัดเจน มีลักษณะเป็นเส้นเล็กๆ บางๆ ที่กระจัดกระจายจนเมื่อมีพลังงานมากพอเส้นรอยไหม้เหล่านั้นจะขยายตัวเชื่อมต่อกันจนเป็นแนวยาวและแตกออกเป็นเส้นเล็กๆ ดังภาพที่ 6 และจากตารางจะสังเกตได้ว่าเวลาที่เกิดรอยไหม้มีความยาวประมาณ 1 นิ้วของตัวอย่างทดสอบทั้ง 10 ตัวอย่าง มีระยะเวลาการเกิดรอยไหม้ใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก



ภาพที่ 6 ลักษณะรอยไหม้บนผิวท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC

ผลการทดสอบราง Cable Tray **ทำมาจาก** PVC

ทดสอบที่แรงดัน 6 kV ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลทดสอบราง Cable Tray

No.	ราง Cable Tray	
	Discharge time (min:sec)	Tracking time (hr:min:sec)
1	01:54	2:20:00
2	00:19	1:50:00

3	00:31	2:10:00
4	00:14	2:00:00
5	00:09	2:10:00
6	00:11	2:20:00
7	00:14	2:10:00
8	00:20	2:20:00
9	00:08	2:20:00
10	00:12	2:10:00
AVG	**00:25**	**2:11:00**

จากตารางที่ 2 ได้พบว่าหลังจากเริ่มการทดสอบก็เกิดเส้นประกายไฟ โดยมีเวลาค่าเฉลี่ยที่ 25 วินาที และเกิดเส้นประกายไฟได้ค่อนข้างเร็วกว่าวัสดุทดสอบตัวอย่างที่ 1 ซึ่งแนวรอยไหม้เป็นเส้นยาวตามแนวทางการไหลของสารละลาย มีการแตกแขนงออกเป็นเส้นเล็กๆ คล้ายกับรากไม้ โดยตลอดแนวรอยไหม้นั้นมีเขม่าสีดำเข้มกระจัดกระจายเกิดขึ้นเยอะมาก ดังภาพที่ 7 ซึ่งจากตารางจะสังเกตได้ว่าเวลาที่เกิดรอยไหม้มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว ตัวอย่างทดสอบทั้ง 10 ตัวอย่าง มีระยะเวลาการเกิดรอยไหม้ใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก



ภาพที่ 7 ลักษณะรอยไหม้บนผิวราง Cable Tray

ผลการทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC เคลือบด้วยสีฉนวนหม้อแปลง

ทดสอบที่แรงดัน 6 kV ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC เคลือบสีฉนวนสำหรับหม้อแปลง

No.	ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC เคลือบด้วยสีฉนวน	
	Discharge time (min:sec)	Tracking time (hr:min:sec)
1	00:16	1:40:00
2	00:08	1:50:00
3	00:05	1:40:00
4	00:10	1:30:00
5	00:06	1:40:00
6	00:14	2:10:00
7	00:03	1:50:00
8	00:05	2:00:00
9	00:08	1:40:00
10	00:04	1:40:00
AVG	**00:08**	**1:46:00**

จากตารางที่ 3 ได้พบว่าหลังจากเริ่มการทดสอบก็เกิดเส้นประกายไฟ โดยมีเวลาค่าเฉลี่ยที่ 8 วินาที และผ่านไปได้ประมาณ 1 ชั่วโมง สีที่เคลือบได้เริ่มนูนพองขึ้นและมีรูเล็กๆ เหมือนฟองอากาศ เมื่อสารละลายไหลผ่านทำให้สีที่เคลือบเป็นรูตลอดแนว ซึ่งผิวฉนวนที่อยู่ข้างใต้รูเล็กๆ จะถูกความร้อนของเส้นประกายไฟจนทำให้เกิดเป็นรอยไหม้ขึ้น มีผงเขม่าเกิดขึ้นเช่นกัน ดังภาพที่ 8 และจากตารางจะสังเกตได้ว่าเวลาที่เกิดรอยไหม้มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว ตัวอย่างทดสอบทั้ง 10 ตัวอย่าง มีระยะเวลาการเกิดรอยไหม้ที่ใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก



ภาพที่ 8 ลักษณะรอยไหม้บนผิวท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC เคลือบด้วยสีฉนวนหม้อแปลง

ผลการทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้าPVC ชุบสี Jotun Hardtop AS เบอร์ 0038 Grey โดยชุบ 2 ชั้น เป็น two-pack polyurethane topcoat ซึ่งเป็นสีใช้ทาภายนอกสำหรับเรือ ห้องเครื่อง

ทดสอบที่แรงดัน 6 kV ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลทดสอบท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ชุบสี Jotun Hardtop AS 2 ชั้น

No.	ท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ชุบสี Jotun Hardtop AS 2 ชั้น	
	Discharge time (min:sec)	Tracking time (hr:min:sec)
1	01:10	7:40:00
2	00:44	8:00:00
3	00:56	8:10:00
4	01:02	8:00:00
5	00:45	8:20:00
6	00:37	7:00:00
7	01:01	7:50:00
8	00:32	8:00:00
9	00:45	8:20:00
10	00:58	8:20:00
AVG	00:51	7:58:00

จากตารางที่ 4 ได้พบว่าหลังจากเริ่มการทดสอบก็เกิดเส้นประกายไฟ โดยมีเวลาค่าเฉลี่ยที่ 51 วินาที ซึ่งสีฉนวนที่ใช้ชุบนี้เป็นสีฉนวนชนิดพิเศษป้องกันแรงดันสูง ทำให้การเกิดเส้นประกายไฟมีความรุนแรงน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างแรก โดยผิวที่ลื่นทำให้หยดสารละลายไหลผ่านบนผิวฉนวนได้เร็ว การเกิดรอยไหม้จึงเป็นไปอย่างช้าๆ และไม่รุนแรง ลักษณะรอยไหม้เป็นเส้นบางเล็กๆ มีการแตกแขนงน้อย เขม่าและควันก็น้อยมาก ดังภาพที่ 9 ซึ่งจากตารางจะสังเกตได้ว่าเวลาที่เกิดรอยไหม้มีความยาวประมาณ 1 นิ้ว ตัวอย่างทดสอบที่ 6 มีระยะเวลาการเกิดรอยไหม้ที่เร็วที่สุดอย่างเห็นได้ชัด อาจจะเนื่องมาจากวัสดุที่นำมาทดสอบต่างช่วงเวลาของการ

ผลิต การขุบสี หรือสภาพอากาศ ความชื้นของชิ้นวัสดุ อุณหภูมิของห้องทดลอง อัตราการไหลของสารละลายที่คลาดเคลื่อน ก็มีผลทำให้วัสดุชิ้นนี้เกิดรอยไหม้เร็วกว่าวัสดุชิ้นอื่นได้



ภาพที่ 9 ลักษณะรอยไหม้บนผิวท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC ขุบสี Jotun Hardtop AS 2 ชั้น

นอกจากนี้ยังทำการทดสอบกับฉนวนโพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น กล่องข้าวที่ใช้กับไมโครเวฟ และ ฉนวน Cross-link Polyethylene (XLPE) ของสายเคเบิลอากาศอลูมิเนียมแรงดัน 22 kV ของระบบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยหลังจากเริ่มการทดสอบฉนวน Polypropylene (PP) มีเวลาที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟที่ 4 นาที ส่วนผลการทดสอบ จะไม่เกิดเป็นรอยไหม้แต่เกิดเป็นลักษณะการหลอมละลาย และการสึกกร่อนของเนื้อวัสดุเนื่องจากความร้อนกระทำเส้นประกายไฟเฉพาะบริเวณขอบวัสดุ ส่วนเนื้อวัสดุที่หลอมละลายมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง ดังภาพที่ 10 โดยเวลาที่เริ่มเกิดการลุกไหม้เท่ากับ 11 ชั่วโมง 40 นาที



ภาพที่ 10 ลักษณะการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นบนฉนวน PP

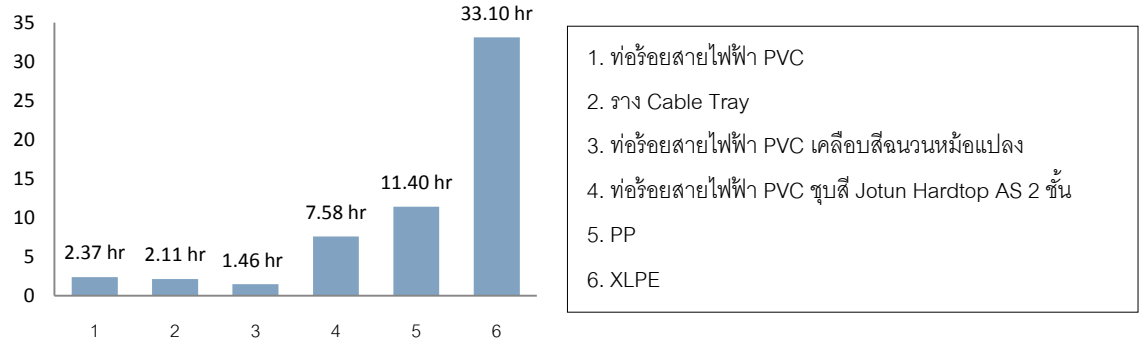
สำหรับฉนวน Cross-link Polyethylene (XLPE) หลังจากเริ่มการทดสอบมีเวลาที่เริ่มเกิดเส้นประกายไฟที่ 10 นาที ส่วนผลการทดสอบคือ เมื่อเส้นประกายไฟรุนแรงขึ้น ทำให้เนื้อฉนวนเกิดการหลอมละลายที่บริเวณขอบของตัวอย่าง เนื่องจากเส้นทางการไหลของสารละลายให้ไหลผ่านเอียงเข้าใกล้ขอบวัสดุทดสอบ รวมทั้งเมื่อติดไฟแล้วจะมีกลิ่นคล้ายกับยางไหม้ และมีร่องลึกจากการหลอมละลาย ค่อนข้างยาวเกิดขึ้นด้วย ดังภาพที่ 11 ซึ่งเวลาที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ เท่ากับ 33 ชั่วโมง 10 นาที



ภาพที่ 11 ลักษณะความเสียหายของ XLPE

ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ว่า ฉนวน XLPE ทนต่อการเกิดรอยไหม้ได้สูงกว่าฉนวน PP และฉนวนที่ทำมาจากวัสดุ PVC โดยเฉพาะท่อร้อยสายไฟฟ้า PVC เคลือบด้วยสีฉนวนหม้อแปลง มีความคงทนต่อการเกิดรอยไหม้ต่ำที่สุด จากผลการทดสอบสามารถหาวิธีป้องกันเบื้องต้นคือ ควรเคลือบผิวฉนวนที่นำมาใช้งาน

เพื่อเป็นการป้องกันผิวฉนวน อาจจะเลือกเป็นสีฉนวนชนิดพิเศษที่ใช้ป้องกันแรงดันสูงโดยเฉพาะ ซึ่งจะเห็นได้จากการทดสอบว่าสีฉนวนทั่วไปที่นำมาเคลือบกลับทำให้ผิวฉนวนเสียหายได้เร็วขึ้น เนื่องจากสีฉนวนทั่วไปมีส่วนผสมของออกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำ และจากที่ได้ทำการบันทึกระยะเวลาที่เกิดรอยไหม้หรือรอยสึกกร่อนของผิวฉนวนความยาวประมาณ 1 นิ้ว สามารถนำแต่ละวัสดุทดสอบมาจัดกลุ่มได้ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟระยะเวลาที่เกิดรอยไหม้หรือรอยสึกกร่อนของผิวฉนวนความยาวประมาณ 1 นิ้ว ของแต่ละวัสดุทดสอบ

สรุป

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามลภาวะ ความชื้น เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ฉนวนมีอายุการใช้งานที่ลดน้อยลง ทั้งยังส่งผลต่อคุณภาพของฉนวนด้วย การแก้ไขเบื้องต้นคือ อาจจะทำการเคลือบสีฉนวน โดยใช้สีฉนวนสำหรับป้องกันแรงดันสูงโดยเฉพาะ เช่น สี Jotun Hardtop AS 0038 เคลือบที่อุปกรณ์ หรืออาจจะแก้ไขโดยการพัฒนาในด้านของโมเลกุลที่นำมาผลิตเป็นฉนวนไฟฟ้าให้มีความต้านทานต่อการ tracking มากขึ้น เพื่อให้การใช้งานของวัสดุนั้นยาวนาน และยังเป็นการลดต้นทุนในการซ่อมบำรุงและเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

IEC 60587 (Third edition 2007-05). **Electrical Insulating Materials used Under Severe Ambient Conditions – Test Methods for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion.**

อนงค์พันธุ์ แม้นอิ่ม และ วินัย พฤกษะวัน. 2553. **การศึกษาการเกิดรอยไหม้เนื่องจากดิสชาร์จไฟฟ้าบางส่วนบนผิวฉนวน**. วิทยาสารเกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์, ฉบับที่ 73 ปีที่ 23, 11-22.

Gabe Paoletti, P.E. and Alex Golubev, PhD. **Partial Discharge Theory and Technologies Related to Traditional Testing Methods of Large Rotating Apparatus**. March 1999, pp. 1-6.

Hackam, R. 1999. **Outdoor HV Composite Polymeric Insulators.** IEEE Trans. OnDielectrics and Electrical, Insulation. 6(5): 557-585.

A.S.G. Alghamdi, D.W.Auckland, A.J. Risno and B.R. Varlow. **Reducing Variability in Inclined-plane Tracking Test Results**. June 1996, pp. 1-5.

โรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า

Hybrid Drying House Using Solar Dryer and Electricity

วันไชย คำเสน[1*] อำนาจ ผัดวัง[1] ชูธง สัมมัตตะ[1] จิรพนธ์ ทาแกง[1] พงศกร สุรินทร์[2]
และสรายุทธ มาลัยพันธุ์[2]

Wanchai Khamsen[1*], Amnaj Patwang[1], Chuthong Summatta[1], Chiraphon Takeang[1], Pongsakorn Surin[2] and Sarayut Malaipun[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า เพื่อใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร โดยโครงสร้างโรงเรือนออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้ และใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นส่วนรับรังสีแสงอาทิตย์ ระบบการทำงานของโรงเรือนอบแห้งมี 2 ระบบ คือ ระบบการทำงานแบบธรรมดา เป็นการอบแห้งโดยใช้รังสีแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวในการอบแห้ง เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน และระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ เป็นการใช้รังสีแสงอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดจากหลอดไฟฟ้าในการอบแห้ง ซึ่งสามารถทำงานได้ต่อเนื่องตลอดทั้งวันทั้งคืน เพื่อการอบใช้เวลาน้อยที่สุด ซึ่งทั้งสองระบบมีการใช้พัดลมดูดอากาศในการระบายอากาศตามความชื้นแบบอัตโนมัติ จากผลการทดสอบอุณหภูมิและความชื้นของโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้าที่สร้างขึ้น อุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งด้วยรังสีแสงอาทิตย์สูงกว่าภายนอกสูงสุด 20 องศาเซลเซียส และเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่จัดทำขึ้นกับโรงเรือนแบบดั้งเดิม แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่จัดทำขึ้นสูงกว่าโรงเรือนแบบดั้งเดิม

ABSTRACT

The purposes of this research were to design and built hybrid drying house using solar radiation and electricity to dry agricultural products. The structure of this drying house was designed for disassembly and used polycarbonate to absorb solar radiation. The drying house comprised two systems: manual and automatic systems. The manual system used only solar radiation to dry products which saved energy. The automatic system consists of solar radiation and infrared lamp to dry products continuously and quickly. Both systems had the automatic ventilation to maintain the humidity inside this house. The results showed that the temperature inside drying house was higher than outside above 20 degree Celsius. The proposed method demonstrated higher temperature compared to those of the conventional method.

Key Words: drying house, solar.

*Corresponding author e-mail: **wanchai_kh@rmutl.ac.th**.

[1]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Lampang,

[2]สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง

[2]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Lampang,

คำนำ

พลังงานถือเป็นสิ่งสำคัญในชีวิตและการเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ ซึ่งประเทศไทยมีการใช้พลังงานในด้านต่างๆ เพิ่มขึ้นทุกปี ในขณะที่พลังงานบางส่วนไม่สามารถนำมาทดแทนได้ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร อาหาร ยางพาราด้านการอบแห้ง เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งมีวิธีการอบแห้งโดยการลดความชื้นมีหลากหลายรูปแบบ เช่น การใช้ลมร้านเป่าผ่านผลผลิต (ระวิน, 2556) เป็นการลดความชื้นแบบตู้หรืออยู่กับที่ จึงเหมาะกับผลผลิตที่เป็นของแข็ง การลดความชื้นแบบลูกกลิ้ง (Drum Drying) และแบบพ่นฝอย (Spay Drying) เป็นการทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นผงหรือเกร็ดเพื่อเก็บรักษาได้นาน (ระวิน, 2556) การลดความชื้นด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) เป็นการลดความชื้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระตุ้นโมเลกุลในผลผลิต ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายรูปแบบเช่น คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ และอินฟราเรด (ระวิน, 2556) ซึ่งแต่ละวิธีที่กล่าวมาเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าไปลดความชื้นทั้งสิ้น จึงมีผู้วิจัยทำการประยุกต์ใช้พลังงานจากรังรังสีแสงอาทิตย์มาลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตร อาหาร ต่างๆ เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน การอบแห้งด้วยรังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทย พบว่า สามารถแบ่งตามวิธีการรับรังสีอาทิตย์ได้ 3 แบบ คือ รับรังสีอาทิตย์โดยตรง โดยอ้อม และแบบผสม มีลักษณะการหมุนเวียนอากาศภายใน 2 ลักษณะ คือหมุนเวียนตามธรรมชาติ (Passive System) และหมุนเวียนแบบบังคับ (Active System) โดยปัจจัยหลักของการเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ คือ อุณหภูมิ ความเร็ว และความชื้นของอากาศในระบบ (จารุวัฒน์, 2555) ทำให้มีการสร้างโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกใช้หลักการเรือนกระจก (Greenhouse Effect) เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านกระจกหรือพลาสติกใสเข้าไปภายใน จะถูกผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบต่างๆ ภายในเรือนกระจกดูดกลืนรังสีแล้วเปลี่ยนเป็นความร้อน วัสดุภายในโรงเรือนจะแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา แต่ไม่สามารถผ่านกระจกออกมาภายนอกได้ ทำให้อุณหภูมิในเรือนกระจกสูงขึ้นและถ่ายเทความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำให้ผลผลิตทางการเกษตรแห้งได้ไว อบได้ในปริมาณครั้งละมากๆ และลดการปนเปื้อนได้ดี (สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์, 2554) จึงมีผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผนราบแบบร่องรูปตัววีสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (ธีระศักดิ์, 2552) ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบแบบร่องรูปตัววีสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ผลิตผลที่ใช้ในการอบแห้ง คือ มะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม โดยมีความชื้นเริ่มต้น 91 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ทำการอบแห้งครั้งละ 5 กิโลกรัม จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 40.30 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จากการทดลองพบว่าในช่วงเวลา 9.00 - 17.00 น. ของวันที่มีท้องฟ้าแจ่มใส อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเฉลี่ยทั้งวันอยู่ที่ 47.0 °C และมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 54.10 °C โดยมีประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงสุดที่ 56.23 % และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 16.90 % เครื่องอบแห้งนี้สามารถอบมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มในเวลา 24 ชั่วโมง ในขณะที่ตากแดดตามธรรมชาติใช้เวลาถึง 48 ชั่วโมง ส่วน (จารุวัฒน์ และคณะ,2554) ได้ทำการวิจัยโดยการออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะของตู้อบแห้งและกลั่นความชื้นรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน สำหรับอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เครื่องอบแห้งดังกล่าวเป็นเครื่องอบแห้งแบบ Passive ทำงานในระบบปิด ที่ปิดคลุมด้วยแผ่นกระจกเอียงทำมุมกับพื้นระดับ 12 องศา เพื่อให้สามารถรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้สูงสุด และแผ่นอะคริลิคใส สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ใน การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการอบแห้ง คือ ระยะเวลาการอบแห้ง และอัตรา

การอบแห้ง ทำการเก็บรวมรวมข้อมูล ในช่วงเวลา 09.00-15.00 น. เป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ผลจากการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยตู้อบแห้งและกลั่นความชื้น รังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน ใช้ระยะเวลาการอบแห้งสั้น อัตราการอบแห้งสูง เมื่อเทียบกับการตากแห้งตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียว จากผลการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งนี้สามารถอบแห้งพริกขี้หนูสด 5 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเฉลี่ย 300 % (d.b.) จนเหลือประมาณ 26 % (d.b.) ภายในเวลา 3 วัน (18 ชั่วโมง) ซึ่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ มีสีสม่ำเสมอทุกถาดและไม่ได้รับความเสียหายจากการเปียกฝน หรือการรบกวนของสัตว์ และแมลงต่างๆ ในขณะที่การตากแห้งตามธรรมชาติมีความชื้นเหลือ ประมาณ 52 % (d.b.) ส่วน (เถลิงราช และคณะ, 2555; พงษ์ศักดิ์ และคณะ, 2550) ได้ศึกษาวิจัยเรื่อง การอบแห้งยางแผ่นผึ่งแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับวิสาหกิจและกลุ่มสหกรณ์สวนยางพาราขนาดย่อมและเปรียบเทียบการอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยการรมควันและอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับการอบแห้งยางแผ่นดิบคุณภาพดี โดยผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งและจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งของยางแผ่นดิบที่ความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 25-40% Dry-basis อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 40-70°C และความเร็วลมร้อนเท่ากับ 0.7 m/s และค่าความชื้นสุดท้ายของยางแผ่นแห้งเท่ากับ 0.5% Dry-basis ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งยางแผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแห้งยางแผ่นตามธรรมชาติ ขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 8-20 MJ/kg ของน้ำที่ระเหย จากการศึกษาปัจจัยของสภาวะการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของยางแผ่นตามเกณฑ์ของตลาดรับซื้อยาง พบว่า คุณภาพของยางพาราแผ่นผึ่งแห้งที่ได้ผ่านเกณฑ์คุณภาพดี (เกรด 1-3) ทุกเงื่อนไขการทดลอง และความเป็นสีเหลืองยางแผ่นแห้งจะแปรตามอุณหภูมิอบแห้ง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้รังสีจากแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้ในการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรในหลายๆ ด้าน ซึ่งปัจจัยหลักของการเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ คือ อุณหภูมิ ความเร็วและความชื้นของอากาศในระบบ แสดงให้เห็นว่าปัจจัยดังกล่าวขึ้นอยู่กับลักษณะเครื่องอบแห้งหรือโรงเรือนที่ใช้อบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า โดยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม และมีลักษณะการหมุนเวียนอากาศภายในหมุนเวียนแบบบังคับ

อุปกรณ์และวิธีการ

การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรต่างๆ ได้มีการศึกษาถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของผลผลิตทางการเกษตร เพื่อใช้ในการอบแห้งดังตารางที่ 1 ทำให้การออกแบบโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า สามารถทำงานได้ 2 ระบบ คือ ระบบการทำงานแบบธรรมดา และการทำงานแบบอัตโนมัติ ในการออกแบบและสร้างโรงเรือนอบแห้งด้วยรังสีแสงอาทิตย์นี้ เป็นการผสมผสานหลักการทำงานของการอบแห้งด้วยรังสีแสงอาทิตย์แบบการรับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง (Direct Solar Drying : DSD) และการรับรังสีแสงอาทิตย์โดยอ้อม (Indirect Solar Drying : ISD) โดยโครงสร้างของโรงเรือนทำจากเหล็กที่สามารถถอดประกอบได้ ทำให้สามารถนำไปติดตั้งในสถานที่ต่างๆ ได้ และใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นแผ่นกั้นโรงเรือน เนื่องจากสามารถดัดโค้งได้ง่าย น้ำหนักเบา และแสงอาทิตย์ผ่านได้ดี โรงเรือนอบแห้งมีขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 4 เมตร และสูง 3.5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1

Table 1 start-final humidity and max temperature boundary of agriculture production drying.

No.	Type	Start humidity (%w.b.)	Final humidity (%w.b.)	Max temperature °C
1	Paddy raw	22-24	11	50
2	Paddy parboiled	30-35	13	50
3	Maize	35	15	60
4	Wheat	20	16	45
5	Corn	24	14	50
6	Rice	20	11	50
7	Pulses	20-22	9-10	40-60
8	Oil seed	20-25	7-9	40-60
9	Green peas	80	5	65
10	Cauliflower	80	6	65
11	Carrots	70	5	75
12	Green beans	70	5	75
13	Onions	80	4	55
14	Garlic	80	4	55
15	Cabbage	80	4	55
16	Sweet potato	75	7	75
17	Potatoes	75	13	75
18	Chillies	80	5	65
19	Apples	80	24	70
20	Apricot	85	18	65
21	Grapes	80	15-20	70
22	Bananas	80	15	70
23	Guavas	80	7	65
24	Okra	80	20	65
25	Pineapple	80	10	65
26	Tomatoes	96	10	60
27	Brinial	95	6	60

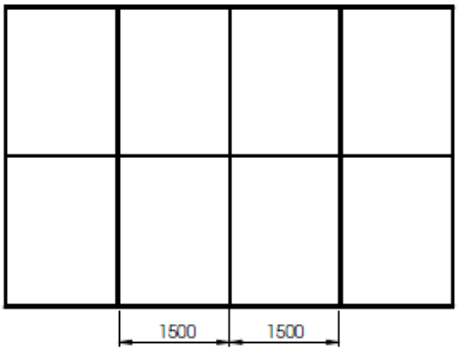
ระบบการควบคุมการทำงานของโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ระบบ คือ ระบบการทำงานแบบธรรมดา และระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ โดยมีการทำงานดังรูปที่ 2

ระบบการทำงานแบบธรรมดา

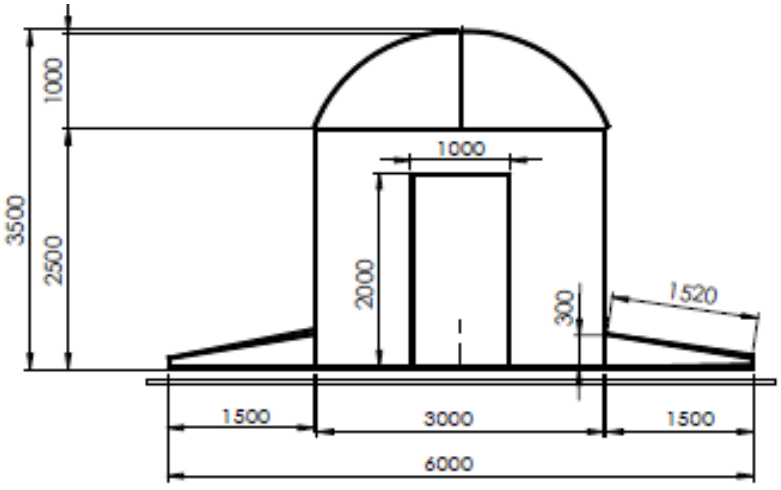
ระบบการทำงานแบบธรรมดาจะออกแบบเพื่อให้ใช้พลังงานไฟฟ้าให้น้อยที่สุด กล่าวคือ การอบแห้งจะใช้รังสีแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวในการอบแห้ง เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน ส่วนการระบายความชื้นจะยังคงใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำให้พัดลมดูดอากาศทำงาน เพื่อระบายความชื้นออกไปด้านนอก โดยที่พัดลมระบายอากาศจะทำงานก็ต่อเมื่อมีความชื้นในโรงเรือนสูงกว่าที่กำหนดไว้เท่านั้น การทำงานในระบบนี้จะสามารถอบแห้งในเวลากลางวันเท่านั้น ซึ่งทำให้เวลามากในการอบแห้ง

ระบบการทำงานแบบอัตโนมัติ

ระบบการทำงานแบบอัตโนมัติจะออกแบบเพื่อให้การอบใช้เวลาน้อยที่สุด กล่าวคือ การอบแห้งจะใช้รังสีแสงอาทิตย์เป็นหลักในการอบแห้ง ส่วนรังสีอินฟราเรดจากหลอดไฟฟ้าจะทำงานในกรณีที่อุณหภูมิภายในโรงเรือนต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถทำงานได้ต่อเนื่องตลอดทั้งวันทั้งคืน เพื่อการอบใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนการระบายความชื้นจะยังคงใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำให้พัดลมดูดอากาศทำงาน เพื่อระบายความชื้นออกไปด้านนอก โดยที่พัดลมระบายอากาศจะทำงานก็ต่อเมื่อมีความชื้นในโรงเรือนสูงกว่าที่กำหนดไว้เท่านั้น การทำงานในระบบนี้จะสามารถอบแห้งทั้งเวลากลางวันและกลางคืน ส่งผลให้ใช้เวลาน้อยในการอบแห้ง ในขณะที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าวิธีระบบการทำงานแบบธรรมดา



a) Side view.



b) Front view.

Figure 1 The construction of drying house.

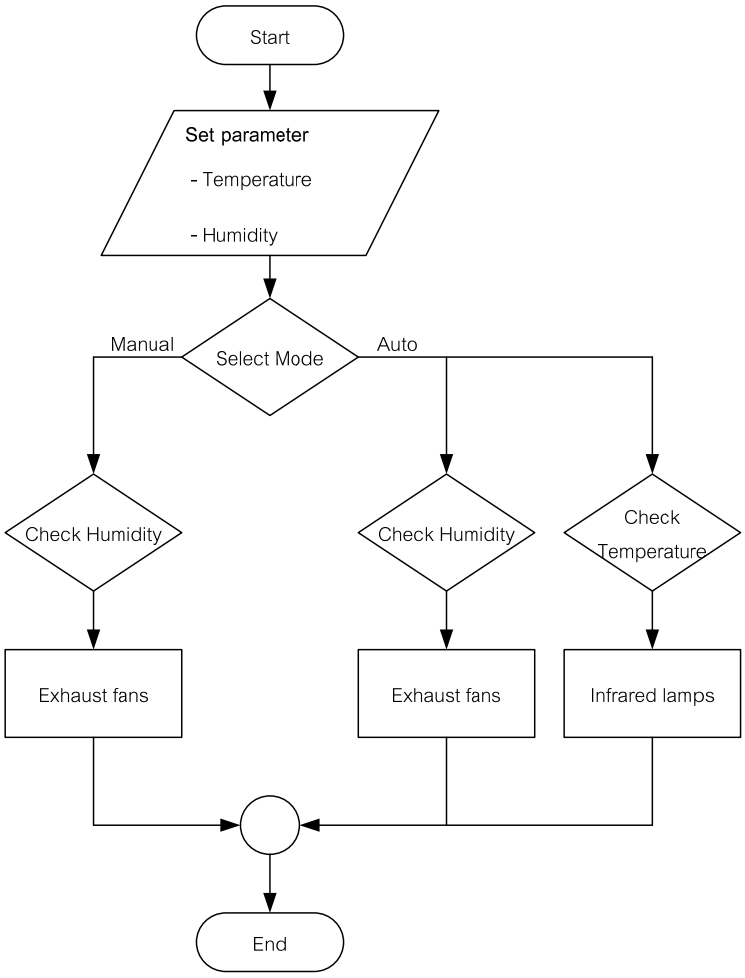


Figure 2 Flowchart of control system.



Figure 3 Drying house prototype.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดสอบโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการอบแห้งโดยใช้โรงเรือนที่สร้างขึ้น โดยดำเนินการทดสอบความร้อนในโรงเรือน 2 รูปแบบ คือ โรงเรือนแบบดั้งเดิมและโรงเรือนที่จัดทำขึ้น โดยวัดค่าต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การใช้พลังงานไฟฟ้า การดำเนินการทดสอบความร้อนในโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า 2 รูปแบบ คือ โรงเรือนแบบ

ดั้งเดิมและโรงเรือนที่จัดทำขึ้น เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโรงเรือน การทดสอบนี้เป็นการวัดอุณหภูมิและความชื้นทั้งภายในและนอกโรงเรือน จำนวน 5 จุด (ภายในโรงเรือน 4 จุด และภายนอกโรงเรือน 1 จุด) ดังแสดงในรูปที่ 4 ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5 จากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นในแต่ละจุดทั้งภายในและภายนอกโรงเรือน ในการเก็บข้อมูลจริง ทำการเก็บข้อมูลการทดสอบโรงเรือนแบบดั้งเดิม (OGH) จำนวน 30 วัน และการทดสอบโรงเรือนที่จัดทำขึ้น (NGH) จำนวน 30 วัน ซึ่งในสภาพอากาศจริงในการเก็บข้อมูลแตกต่างกันคือ แดดจัด มีดครึ้ม และฝนตก รูปที่ 5 a) เป็นผลการทดสอบอุณหภูมิภายในโรงเรือนทั้งแบบดั้งเดิม (OGH) และแบบที่จัดทำขึ้น (NGH) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโรงเรือนที่จัดทำขึ้นมีค่าความร้อนที่สูงกว่าโรงเรือนแบบดั้งเดิม ส่งผลทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพมากกว่า ในขณะที่รูปที่ 5 b) แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในและภายนอกของโรงเรือนทั้งแบบดั้งเดิม (OGH) และแบบที่จัดทำขึ้น (NGH)

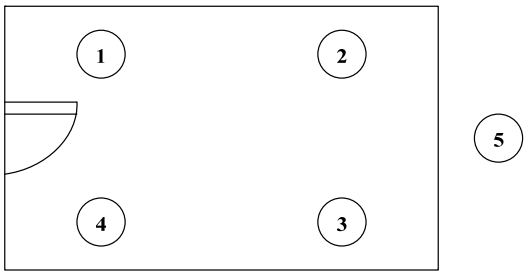
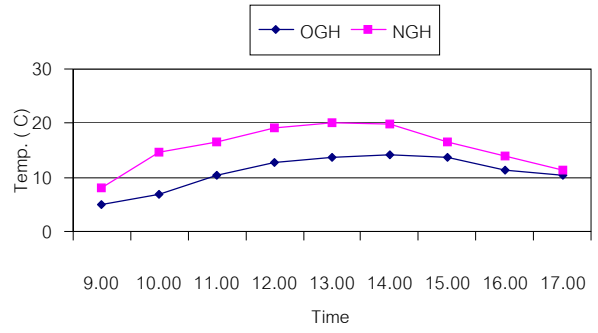
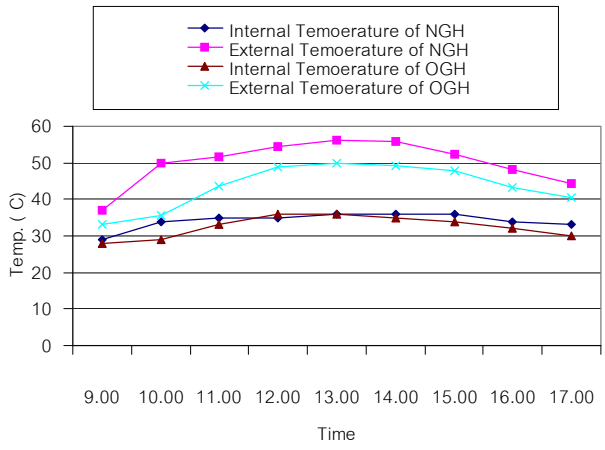


Figure 4 The measuring position of the temperature and humidity.



a)



b)

Figure 5 Comparison of the temperature and humidity, OGH and NGH .

สรุป

จากการออกแบบ สร้าง และทดสอบโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า สามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

1. สามารถการอบแห้งได้ 2 ระบบ คือแบบธรรมดาและแบบอัตโนมัติ

2. อุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งด้วยรังสีแสงอาทิตย์สูงกว่าภายนอกสูงสุด 20 องศาเซลเซียส

3. ระบบการทำงานโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้าแบบธรรมดามีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อย แต่ใช้เวลานานในการอบแห้ง

4. ระบบการทำงานโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้าแบบอัตโนมัติมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าแบบธรรมดา ในขณะที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า

ดังนั้นโรงเรือนอบแห้งพลังงานร่วมด้วยรังสีแสงอาทิตย์และไฟฟ้า สามารถนำไปใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เพื่อช่วยเกษตรกรในการอบแห้งและเพิ่มมูลค่าของผลผลิต

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการยกระดับคุณภาพชีวิตของชุมชนผู้ปลูกสับปะรด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง

เอกสารอ้างอิง

จารุวัฒน์ เจริญจิต และคณะ. 2554. **ตู้อบแห้งและกลั่นความชื้นรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน**. วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 38 ฉบับที่ 1. หน้า 35-42.

จารุวัฒน์ เจริญจิต. 2555. **เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์และแนวทางการพัฒนา**. วารสารวิจัย มข. ปีที่ 17 ฉบับที่ 1. หน้า 110-124.

เถลิงราช นิลเชื้อวงศ์ และคณะ. 2555. **การอบแห้งยางแผ่นผึ่งแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนและเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับวิสาหกิจและกลุ่มสหกรณ์สวนยางพาราขนาดย่อม**. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. ปีที่ 17 ฉบับที่ 2. หน้า 50-59.

ธีระศักดิ์ หุดากร. 2552. **การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบแบบร่องรูปตัววี สำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23.

พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น ศิริชัย เทพา และพิชัย นามประกาย. 2550. **เปรียบเทียบการอบแห้งยางพาราแผ่นด้วยการรมควันและอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์**. การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1. หน้า 1-7.

ระวิน สืบค้า. 2556. **เทคโนโลยีการลดความชื้น**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 23 ฉบับที่ 2. หน้า 500-512.

สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์. 2554. **คู่มือเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์**. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

การกำหนดเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการจัดสมดุลและวางแผนทรัพยากรโดยการจำลองสถานการณ์ในฝ่ายควบคุมคุณภาพโรงงาน

Determining of an optimal conditions for work balancing and manpower in quality control department using simulation approach

ภรภัทร แก้วเขียว[1*] สุริยพงศ์ นิลสังข์[1] และ ชุมพล ยวงใย[1]

Pornrapat Kaewkhiew[1*], Suriyaphong Nilsang[1] and Chumpol Yuanyai[1]

บทคัดย่อ

การพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ถือเป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อเศรษฐกิจ จากแนวโน้มจำนวนการผลิตที่สูงขึ้นทุกปีนำไปสู่ความจำเป็นในการพัฒนากระบวนการทำงานให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญคือ การวัด และการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำซึ่งเป็นหลักประกันสำคัญที่แสดงว่าผลิตภัณฑ์เป็นไปตามข้อกำหนดคุณภาพ โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาโรงงานออกแบบและผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งมีการเพิ่มงานบริการตรวจสอบชิ้นงานนอกสถานที่ให้แก่ห้องปฏิบัติการโดยใช้กำลังคนและเครื่องมือจำนวนเท่าเดิม ทำให้เกิดปัญหาด้านการวางแผนทรัพยากรให้เหมาะสมกับภาระงานที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดสมดุลและวางแผนการใช้ทรัพยากรให้เหมาะสมกับงาน โดยสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation) ของห้องปฏิบัติการฝ่ายควบคุมคุณภาพของโรงงาน พบว่า สามารถลดเวลารวมลงได้ 5.93 % มีค่าเฉลี่ยของการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรเพิ่มขึ้น 60.5 %

ABSTRACT

The automotive industry has an impact on the economy. Its production trend is increasing every year; therefore, this paper focused on the improvement of quality control department especially in testing and measuring of automotive parts. At current situation, the department encountered the increasing of the service work outside the laboratory while manpower level and equipment remained the same. Then, this study used simulation approach to investigate the current process; it was found that there was the unbalancing between manpower level and workload. After using ECRS techniques, the total completing time of tasks reduced by 5.93% and the average resources utilization increased 60.5%.

Key Words: การจำลองสถานการณ์ , การจัดสมดุล , การใช้ประโยชน์ทรัพยากร

Corresponding author; e-mail address: **pornrapat.kaewkhiew@gmail.com**

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

ปัจจุบันธุรกิจด้านยานยนต์มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง คุณภาพของสินค้า การวัดและการทดสอบที่มีความถูกต้องและแม่นยำจึงเป็นหลักประกันทางเทคนิคที่สำคัญสำหรับแสดงว่าผลิตภัณฑ์เป็นไปตามข้อกำหนดทางคุณภาพ ดังนั้นระบบการตรวจวัดจากห้องปฏิบัติการจึงเป็นระบบตรวจวัดคุณภาพ และความสามารถของห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญต่อข้อมูลคุณภาพสินค้าและความน่าเชื่อถือของอุตสาหกรรม ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโรงงานที่ดำเนินธุรกิจทางด้านการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และทางด้านการให้บริการทดสอบและสอบเทียบเครื่องมือวัดในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งมีรูปแบบการดำเนินงานแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกให้บริการสอบเทียบเครื่องมือวัด ส่วนที่สองให้บริการการทดสอบ และส่วนที่สามให้บริการตรวจวัดเพื่อทำให้เกิดความมั่นใจว่าสามารถผลิตสินค้าที่ได้มาตรฐาน โดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการรับใบคำร้องขอการตรวจวัด ทดสอบ และ สอบเทียบ จนถึงผู้ขอรับบริการได้รับรายงานผล

ทั้งนี้การเข้ามาของผู้ขอรับบริการนั้นไม่สามารถคาดเดาได้แน่นอน เนื่องจากมีการให้บริการในหลายหน่วยงาน ได้แก่ ภายในโรงงาน โรงงานในเครือ และบริการลูกค้าทั่วไป ซึ่งนโยบายของห้องปฏิบัติการของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงโดยการรับงานบริการตรวจสอบชิ้นงานด้วยการตรวจสอบรูปลักษณะ (Appearance visual check) และตรวจสอบการวัดขนาด (Dimension) หรือตรวจสอบอื่น ๆ ตามการร้องขอภายนอกสถานที่ ทำให้เกิดปัญหาด้านการวางแผนบุคลากรให้เหมาะสมกับปริมาณงานที่เพิ่มขึ้น ประกอบกับการศึกษางานวิจัยในห้องปฏิบัติการยังไม่พบว่ามีการใช้แบบจำลองสถานการณ์ในห้องปฏิบัติการของโรงงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดสมดุลและวางแผนการใช้ทรัพยากรให้เหมาะสมกับงาน โดยสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation) ของห้องปฏิบัติการฝ่ายควบคุมคุณภาพของโรงงาน เพื่อปรับปรุงกระบวนการทำงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

การจำลองสถานการณ์ เป็นการเลียนแบบการทำงานของกระบวนการจริงหรือระบบในช่วงเวลาหนึ่ง มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัย เงื่อนไข หรือ พฤติกรรมผ่านระบบ โดยในปัจจุบันมีโปรแกรมการจำลองบนคอมพิวเตอร์ให้เลือกมากมาย (วุฒิชัย, 2555) และได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจึงทำให้การจำลองสถานการณ์สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้กับหลายหน่วยงาน เช่น อุตสาหกรรมโรงงาน การขนส่ง การกระจายสินค้า หรือ ธนาคาร เป็นต้น (Kelton et al., 2003) ข้อดีคือทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างชัดเจน อีกทั้งปรับเปลี่ยนกระบวนการได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องทดลองปรับเปลี่ยนที่กระบวนการจริง ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาและค่าดำเนินการสูง ได้มีการนำเอาแบบจำลองสถานการณ์มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆ เช่น

กัลญารัตน์ หลวงมูล (2555) ได้ทำการศึกษาพัฒนาตัวแบบจำลองสถานการณ์แบบไม่ต่อเนื่องของห้องปฏิบัติการของคลินิค โดยศึกษาถึงการลดเวลารวมในระบบ เวลารอคอย เวลาในการเคลื่อนย้าย และเวลาใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์ โดยใช้เปลี่ยนการวางผัง แผนภูมิความสัมพันธ์ และปรับเปลี่ยนตำแหน่งของพนักงาน

Markus et.al (2014) ได้นำเสนอสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมของบริษัทรถยนต์ในเรื่องการจัดการด้านความผันแปรของกำลังการผลิตและการจัดสรรแรงงานที่ต้องการความยืดหยุ่นของงานแล้วนำเอาการจำลอง

สถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคาดการณ์การปรับเปลี่ยนทางด้านแรงงานให้ยืดหยุ่นและตรวจสอบผลการสมดุล

Zupan and Herakovic (2015) ได้นำเสนอกรณีศึกษาการจัดความเหมาะสมให้กับสายการผลิตโดยการจัดสายสมดุลและการจำลองสถานการณ์แบบไม่ต่อเนื่องจากสายการผลิตจริงมี 2 ผลิตภัณฑ์ซึ่งผลิตในสถานที่ผลิตเดียวกันงานด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ให้ได้ผลลัพธ์มาเป็นข้อมูลเริ่มต้น แล้วดำเนินการตามหลักการการจัดสายสมดุลทางการผลิตให้ได้เพื่อแนวทางการปรับปรุงของสายการผลิต

Moreira et al. (2015) ได้ศึกษาสายการประกอบในโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกันในเรื่องของแรงงานคนและเครื่องจักรโดยมีเป้าหมายมอบหมายงานให้กับคนเพื่อให้ได้งานเต็มจำนวน

กัณศิริ กิตติภากร (2553) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ สภาวะว่างงานของพนักงานระหว่างกระบวนการผลิตหลังจากปรับปรุงสามารถลดจำนวนพนักงานซึ่งมีผลให้อัตราผลผลิตด้านแรงงานเพิ่มขึ้นและค่าการใช้ประโยชน์เฉลี่ยของพนักงานเพิ่มขึ้นจากเดิม

หลักการจัดสายสมดุลคือการพยายามที่จะจัดให้สถานีต่าง ๆ มีอัตราการทำงานหรือเวลาที่ใช้เท่าๆ กัน แล้วหาจำนวนจำนวนพนักงานหรือสถานีอย่างน้อยที่ต้องการ (บรรหาญ, 2553) แล้วค้นหาความสูญเปล่า (ECSR) ในแต่ละสถานีด้วยหลักการการกำจัดขั้นตอนงานที่ไม่จำเป็นออกไป (Eliminate) การรวมขั้นตอนหลายส่วนเข้าด้วยกัน (Combine) การจัดลำดับขั้นตอนใหม่ (Rearrange) การปรับปรุงการทำงานให้ง่ายขึ้น (Simplify) (กัณศิริ, 2553) ดังนั้นการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้การสร้างแบบจำลองสถานการณ์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่มีการใช้แบบจำลองสถานการณ์ในห้องปฏิบัติการเพื่อจัดสมดุลงาน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการสร้างจำลองสถานการณ์เพื่อจัดสมดุลงานของห้องปฏิบัติการในโรงงานของฝ่ายควบคุมคุณภาพ

ลักษณะการทำงานของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ

การดำเนินงานโดยทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งการสอบเทียบที่กระทำในโรงงาน คือ การสอบเทียบที่กระทำขึ้นเองภายในโรงงาน ส่วนการทำงานของห้องปฏิบัติการสอบเทียบในโรงงานมีลักษณะการดำเนินงานที่สามารถเทียบเคียงได้กับกระบวนการผลิตกล่าวคือ มีชิ้นงานที่รับเข้าสู่ระบบเพื่อผ่านกระบวนการต่างๆ และมีข้อมูลที่ส่งออกจากระบบ (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น, 2551, 2546) ซึ่งโรงงานกรณีศึกษากระบวนการเริ่มต้นจากการรับใบคำร้องขอตรวจวัด ทดสอบ และ สอบเทียบ (Services arrival) ส่งให้หัวหน้าส่วนงานห้องปฏิบัติการพิจารณาเบื้องต้น (Transection review) ขั้นตอนต่อไปตัดสินใจนำส่ง (Decide calibration or evaluation) แก่หัวหน้างานทดสอบและสอบเทียบ (Leader 1 review) หรือ หัวหน้างานตรวจวัดและงานนอกสถานที่ (Leader 2 review) ด้วยสัดส่วนร้อยละ 31 และ 69 ตามลำดับ ขั้นต่อมาหัวหน้างานจะทำการมอบหมายงานให้แก่พนักงานผู้ปฏิบัติการ ได้แก่ งานสอบเทียบ (Calibration) งานตรวจวัดด้วยเครื่อง CMM งานตรวจวัดด้วย Laser scanและ งานทดสอบ (Testing) ด้วยสัดส่วนร้อยละ 37 , 23 ,19 และ 21ตามลำดับ ส่วนงานตรวจวัดด้วยฟิกซ์เจอร์ (Fixture) และงานตรวจสอบนอกสถานที่ (Outside) มีสัดส่วนร้อยละ 85 และ 15 ตามลำดับ จากนั้นพนักงานผู้ปฏิบัติการทำงานตามที่ได้รับมอบหมายจนได้รายงานผลการตรวจจะนำมาส่งให้แก่หัวหน้างานทบทวน (2 review) แล้วนำส่งให้ผู้จัดการอนุมัติ (Manager approval process) ขั้นตอนสุดท้ายธุรการจะนำรายงานผลการตรวจส่งให้แก่ผู้ขอรับบริการดัง Figure 1

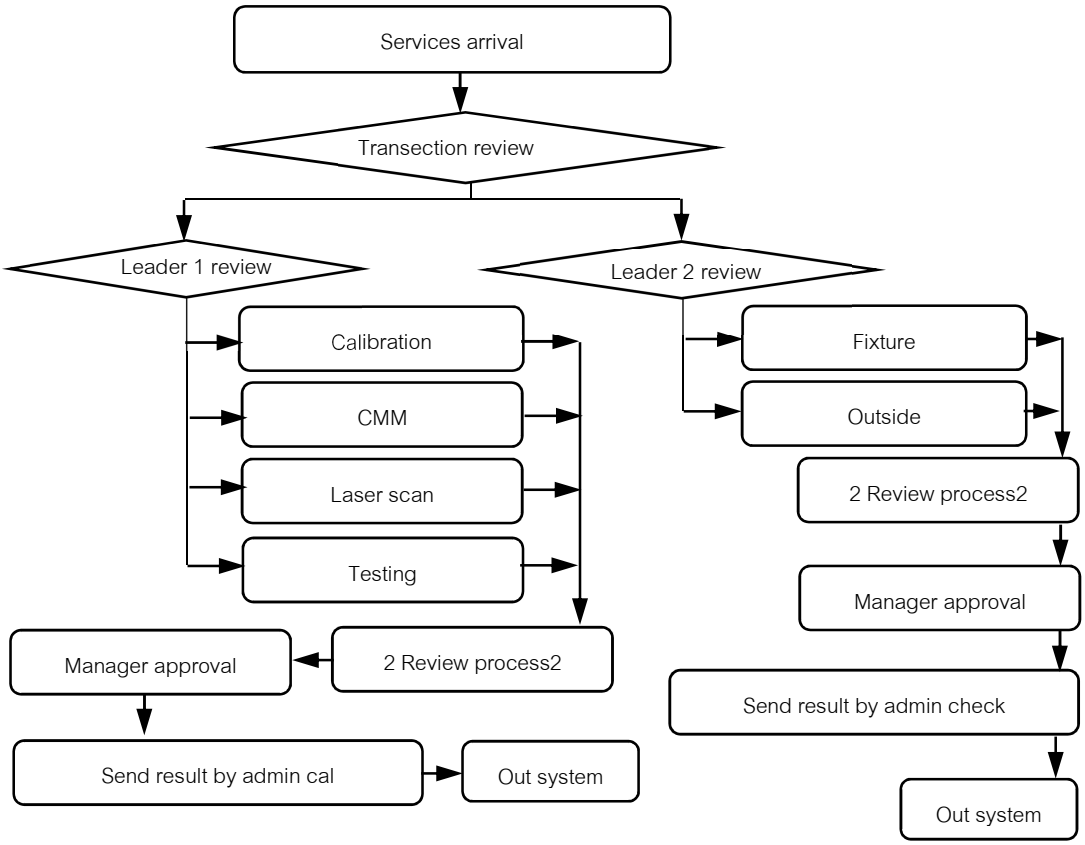


Figure 1 Activity diagram process of service and calibration

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

กระบวนการในการออกแบบและสร้างแบบจำลองสถานการณ์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ปัจจัยนำเข้า (Input) การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (model) และ ผลลัพธ์ (output) ดัง Figure 2

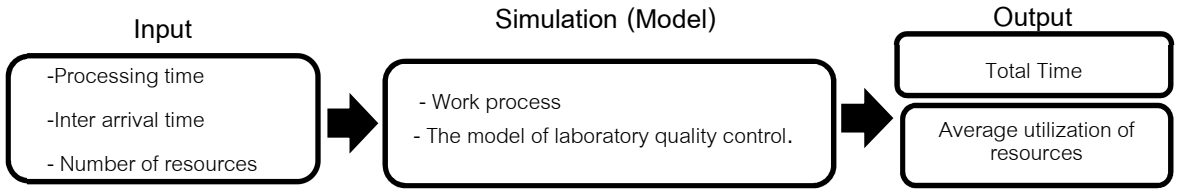


Figure 2 diagram process of Simulation

ปัจจัยนำเข้า (Input)

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูล 24 ชั่วโมงในช่วงเดือนมีนาคม ถึงเดือนมิถุนายน 2558 สำหรับการเข้ามาของผู้รับบริการแล้ววิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าด้วยการใช้เครื่องมือของ Input analyzer ของโปรแกรม Arena หาค่าที่เหมาะสม (Fit) ได้ผลลัพธ์ดัง Figure 3

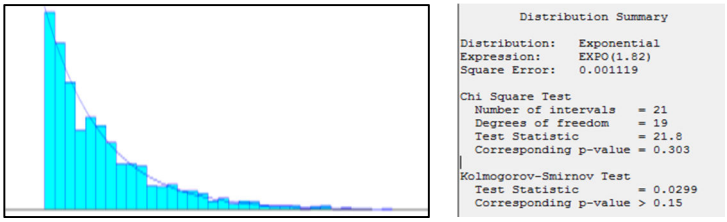


Figure 3 Distribution fitting of collection data

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model)

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีการแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Event Simulation) ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมการจำลองสถานการณ์ Arena เมื่อทำการศึกษารูปแบบกระบวนการทำงานจาก Figure 1 และคำอธิบายดัง Table 1 , 2 , 3 และ 4 โดยมีพนักงาน 15 คน หัวหน้างาน 3 คน และ เจ้าหน้าที่ธุรการ 2 คน โดยสามารถเขียนแบบจำลองได้ดัง Figure 4

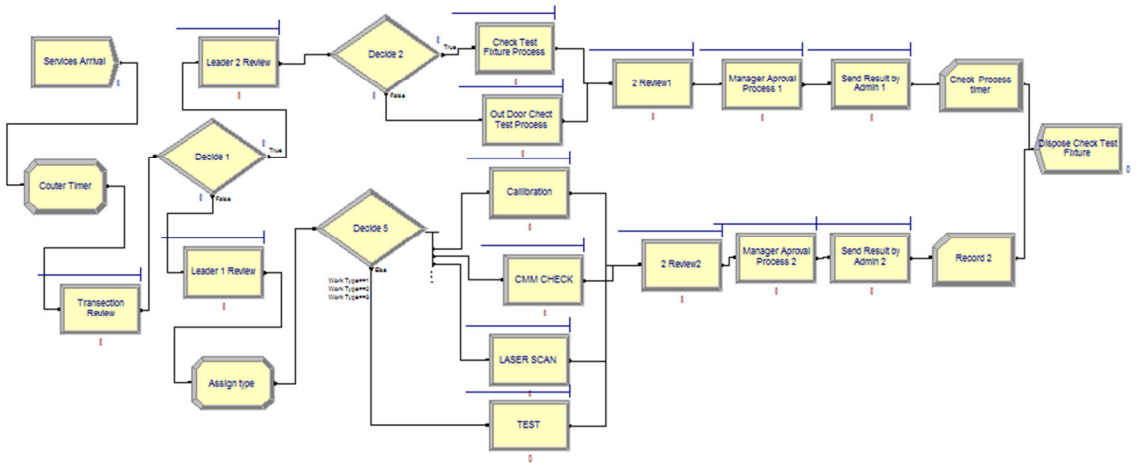


Figure 4 Simulation model by Arena

Table 1 Services Arrival Module

Name	Entity type	Expression	Key Attribute	Description
Services Arrival	Services	EXPO(1.82)	Entities per Arrival: 1 Max Arrival : Infinite	Create the services arriver

Table 2 List of Assign Module

Name	Type	Attribute name	New value
Counter Timer	Attribute	TimeEnter	TNOW
Assign type	Attribute	Work type	DISC(0.37,1,0.60,2,0.79,3,1,4)

Table 3 List of Process Module

Name	Action	Delay Type	Min	Value	Max
Transection review	Size delay Release	Triangular	0.05	0.1	0.12
Leader 2 review	Size delay Release	Triangular	0.25	0.5	1
Check test fixture process	Size delay Release	Triangular	0.1	0.25	0.5
Manager approval process	Size delay Release	Constant	-	0.1	-
Send result by admin check	Size delay Release	Constant	-	0.1	-
Outside check process	Size delay Release	Triangular	6	7	8
2 review	Size delay Release	Triangular	0.5	1	1.5
Leader 1 review	Size delay Release	Triangular	0.5	1	1.5
Calibration	Size delay Release	Triangular	3	3.5	4
CMM check	Size delay Release	Triangular	1	2	3
Laser scan	Size delay Release	Triangular	4	5	6
Test	Size delay Release	Triangular	5	7	8
Send result by admin cal	Size delay Release	Constant	-	0.1	-
Manager approval process	Size delay Release	Constant	-	0.1	-

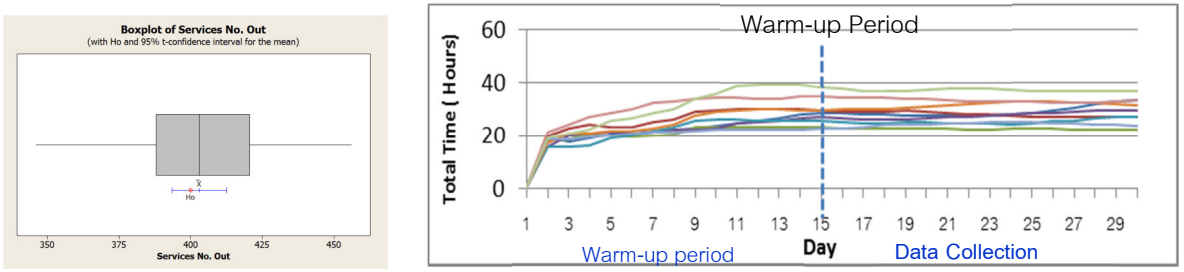
Table 4 List of Decide Module

Name	Type	Percent True	Condition
Decide Calibration or Evaluation	2-way by change	69	-
Decide fixture or out door	2-way by change	85	-
Decide calibration CMM test or laser scan	N-way by change	-	Attribute Work Type , IS: == 1
			Attribute Work Type , IS: == 2
			Attribute Work Type , IS: == 3

ผลลัพธ์ (output)

การทดสอบถูกต้องและความสมเหตุสมผล

การตรวจสอบของแบบจำลองที่สร้างขึ้นนำมาเปรียบเทียบกับระบบจริงปัจจุบันที่มีผลลัพธ์ของจำนวนงานที่ออกจากระบบ (Services number out) โดยเฉลี่ย 400 รายการต่อเดือนและ มีรอบเวลาทำงานเฉลี่ย (total time) 36 ชั่วโมง ด้วยกำหนดค่านัยสำคัญ 0.05 (α=0.05) ด้วยวิธี One sample t-test โดยผลลัพธ์ พิจารณาค่า p-value = 0.523 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 และเมื่อพิจารณา boxplot จะเห็นได้ว่าค่าของสมมติฐานหลักอยู่ในช่วงระบบจริง แสดงดัง Figure 5 (a)



(a) (b)

Figure 5 Validation of simulation model (a) service number out by one Sample t- test (b) Specifying warm-up period base on total time

จึงสรุปได้ว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอจะกล่าวว่าผลลัพธ์ของจำนวนงานที่ออกจากระบบ (Services number Out) ของแบบจำลองและระบบจริงมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความคล้ายกับระบบจริงในการทำงาน เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นระบบที่ไม่มีจุดสิ้นสุด (Nonterminating system) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่อยู่ในสภาวะสมดุล (Steady-state system) จึงทำการรันแบบจำลองคำนวณหาผลลัพธ์มาสร้างกราฟโดยกำหนดค่า Warm-up period พบว่ามีการแกว่งอยู่ในช่วง 15 วันแรกก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุล ดัง Figure 5 (b) เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม จะทำการเก็บรอบเวลาเฉลี่ยของวันที่ 15 ของการทำงานเป็นต้นไปเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดที่มาจากการแกว่งของข้อมูล

การวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุง

จากการวิเคราะห์งานในปัจจุบัน ผู้วิจัยสนใจทรัพยากร (resources) ที่มีผลต่อเวลารวม (Total time) คือ Calibration , CMM , Laser scan , Testing , Fixture และ Outside พบว่าอัตราการใช้ประโยชน์พนักงานมีค่าต่ำ ดังตารางที่ 6 ผู้วิจัยจึงออกแบบแนวคิดทางเลือกตามหลัก ECRS ในการปรับปรุงเพื่อมาสร้างแบบจำลอง

เงื่อนไขการทำงานปรับปรุงทางเลือกที่ 1 (Scenario 1) มีแนวคิดรวมกลุ่มงานที่มีค่าการใช้ประโยชน์ต่ำและพนักงานต้องใช้ทักษะของเครื่องคล้ายคลึงกันเข้ามารวมกัน โดยรวมเอางานการสอบเทียบ การตรวจวัดด้วย CMM และ เครื่อง LASER SCAN เข้าเป็นหน่วยงานเดียวกัน โดยกำหนดเวลาที่ใช้ในการทำงานเท่ากับงาน LASER SCAN

เงื่อนไขการทำงานปรับปรุงทางเลือกที่ 2 (Scenario 2) มีแนวคิดรวมกลุ่มงานเข้าเป็นหน่วยงานเดียวกันเหมือนกับเงื่อนไขการทำงานปรับปรุงทางเลือกที่ 1 และลดจำนวนพนักงานในกลุ่มงานนี้ลงเหลือ 2 คน

เงื่อนไขการทำงานปรับปรุงทางเลือกที่ 3 (Scenario 3) มีแนวคิดรวมกลุ่มงานเข้าเป็นหน่วยงานเดียวกันเหมือนกับเงื่อนไขการทำงานปรับปรุงทางเลือกที่ 2 และลดจำนวนพนักงานบริการตรวจสอบชิ้นงานนอกสถานที่เหลือ 1 คน

ซึ่งกำหนดเงื่อนไขการปรับปรุงทางเลือกและผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองโดยใช้จำนวน 30 รอบทำซ้ำ มี Warm-up period เท่ากับ 15 วัน รอบทำซ้ำ (Run Length) คือ 45 วัน ดังแสดงใน Table 7

Table 6 Summary Result of Current work

Event	TIME	Utilization / persion						Total time	Mean	S.D.(Utilization)	Services	Description
		Calibration	CMM	Laser scan	Testing	Fixture	Outside	(HRS.)	(Utilization)		No. Out	
Traditional	08:00 -17:00	3	1	1	2	3	3	38.48	22.91%	20.48%	424	Cuurent Model
	20:00– 05:00	0	0	0	0	2	0					
	Utilization	12.73%	7.57%	15.63%	15.53%	63.53%	22.45%					

Table 7 Summary Result of work balancing concept

Event	TIME	Utilization / persion				Total time	Mean	S.D.(Utilization)	Services	Description
		Calibration & CMM & Laser scan	Testing	Fixture	Outside	(HRS.)	(Utilization)		No. Out	
Scenario 1	08:00 -17:00	5	2	3	3	39.95	29.50%	23.38%	425	Balancing by ECRS concept
	20:00– 05:00	0	0	2	0					
	Utilization	22.47%	15.64%	64.24%	15.64%					
Scenario 2	08:00 -17:00	2	2	3	3	39.17	35.06%	21.22%	424	Balancing by ECRS concept
	20:00– 05:00	0	0	2	0					
	Utilization	36.84%	16.24%	64.18%	22.99%					
Scenario 3	08:00 -17:00	2	1	5	1	36.2	36.77%	10.21%	426	Balancing by ECRS concept
	20:00– 05:00	0	0	3	0					
	Utilization	36.75%	22.93%	47.24%	40.15%					

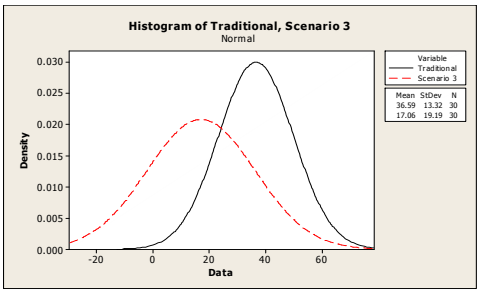


Figure 6 Model validation base on Services number out by One Sample t test

จากข้อมูล Table 7 และ Figure 6 เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ของจำนวนงานที่ออกจากระบบจากแบบจำลองการทำงานปัจจุบัน (Traditional) แบบจำลองการทำงานปรับปรุงทางเลือกที่ 1 ทางเลือกที่ 2 (และ

ทางเลือกที่ 3 พบว่า เวลารวมมีค่าเท่ากับ 38.48 , 39.95 , 39.17 และ 36.20 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยของการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรต่อคนเท่ากับ 22.91 , 29.5 , 35.06 และ 36.77 ตามลำดับ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการใช้ประโยชน์ทรัพยากรเท่ากับ 20.48 , 23.38 , 21.22 และ 10.21 ตามลำดับ โดยยังได้ผลลัพธ์ของงานที่ออกจากระบบเท่าเดิมคือเฉลี่ย 424 รายการต่อเดือน

สรุป

จากการศึกษาการจัดสมดุลและวางแผนทรัพยากรโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์สามารถปรับปรุงกระบวนทำงานภายในห้องปฏิบัติการของฝ่ายควบคุณภาพในโรงงาน ร่วมกับการจัดสมดุลงานและบุคลากร ด้วยหลักการลดความสูญเปล่า เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ดีที่สุดคือแบบจำลองการทำงานทางเลือกที่ 3 (Scenario 3) สามารถ ลดเวลารวมลงได้ 5.93 % มีค่าเฉลี่ยของการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรเพิ่มขึ้น 60.5 % ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการใช้ประโยชน์ทรัพยากรลดลง 50.15% โดยทำให้การทำงานของแต่ละสถานีเพิ่มมากขึ้น และภาระงานของแต่ละสถานีใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับระบบการทำงานปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

กัณศิริ กิตติภากร. 2553. **การจัดสมดุลสายการผลิตและวางแผนทรัพยากรโดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อาหาร**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กัลญารัตน์ หลวงมูล. 2555. **การลดเวลาทั้งระบบของห้องปฏิบัติการคลินิก**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาตร์, กรุงเทพฯ.

บรรหาญ ลีลา. 2553. **การวางแผนและควบคุมคุณภาพการผลิต**. สำนักพิมพ์พิมพ์ท๊อป, กรุงเทพฯ.

วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร. 2555. **การวิเคราะห์แบบจำลอง Simulation model Analysis**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: URL: www.http:/wuthichai.ie.engr.tu.ac.th

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2546. **คู่มือการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม**. ส่วนวรสารวิชาการ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2551. **การสอบเทียบเครื่องมือวัด**. ส่วนวรสารวิชาการ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

Kelton, W.D., Sadowskl, R.P. and Sturrock, D.T. 2003. **Simulation with Arena**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.

Markus et.al. 2014. Production line balancing with discrete event simulation: A Case study. **IFAC – Papers online** 48-3: 2305-2311.

Moreira, M. C. O. et.al. 2015. Robust assembly line balancing with heterogeneous workers. **Computer & Industrial Engineering** 88: 254-263.

Zupan, H. and Herakovic, N. 2015. Validation of Line Balanacing by simulation of Production line. **Science Direct – Papers Online Procedia**: 93-98.

การวิเคราะห์โซ่คุณค่าเมล่อนในจังหวัดจันทบุรีและฉะเชิงเทรา

The Value Chain Analysis of Melon in Chanthaburi and Chachoengsao Province

ชฎารัตน์ เตชอยู่สุขเจริญ[1*] และ ปุณณมี สัจจกมล[1]

Chadarat Tachayousukjaroen[1*] and Punnamee Sachakamol[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาเพื่อวิเคราะห์โซ่คุณค่าเมล่อนในจังหวัดจันทบุรีของโรงงานตัวอย่าง และจังหวัดฉะเชิงเทราของไร่เมล่อนตัวอย่าง โดยเริ่มศึกษาตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบของเกษตรกรผู้เพาะปลูกส่งต่อไปยังโรงงานแปรรูป การจัดส่งสินค้า การตลาดและการบริการ และเพื่อวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนภายในโซ่คุณค่าซึ่งสามารถนำมาหาแนวทางในการสร้างมูลค่าเพิ่มได้ ผลการศึกษาพบว่าเกษตรกรยังขาดแคลนทางด้านแรงงาน ปัจจัยการผลิต ความรู้ในการเพาะปลูก จึงส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนและผลตอบแทนของการเพาะปลูก ในส่วนของโรงงานสัดส่วนของเสียสามารถนำมาสร้างมูลค่าเพิ่มได้ คือ เปลือก เมล็ด ผลเสีย มีอยู่ร้อยละ 20.53 สามารถนำไปทำเป็นน้ำหมักชีวภาพได้ และกากเหลือทิ้งจากผลิตภัณฑ์น้ำเมล่อนเข้มข้น ร้อยละ 30.74 สามารถนำไปทำเป็นไส้ขนมโมจิหรือ เมล่อนหยีได้ ทำให้สัดส่วนของเสียในโรงงานเกือบจะเป็นศูนย์ และทำให้ได้ผลตอบแทนเพิ่มขึ้น

ABSTRACT

This research aimed to investigate the value chain of melon for the factory in Chanthaburi Province and the farm in Chachoengsao Province. The study began from raw material acquisition of farmer forwarded to processing plants, delivery, marketing and service. Another goal was to analyze the costs and compensation of value chain in order to determine the value added process. It was found that the farmers were deficient in labor and knowledge in proper cultivation and process, which directly affected the cost and benefits of melon farm. In terms of waste from production process (20.53 percent), for example, skins, seeds and melon waste could be further processed for the bio-fermentation. Moreover, the waste from the production of concentrated melon syrup (30.74%) could be prepared as sweet cream in mochi cake or melon yee to reduce the waste of the factory to near zero and increased the profitability of the factory.

Key Words: melon, value chain, cost and returns

[*] Corresponding author; e-mail address: T.chadarat@hotmail.com

[1] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

สำหรับประเทศไทยมีการปลูกเมล่อนมากในภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออก ซึ่งมีเนื้อที่ให้ผลรวมทั้งประเทศ 1,049 ไร่ ผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 2,044 กิโลกรัม (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) มีเมล่อนหลายสายพันธุ์ที่เจริญเติบโตได้ดี หนึ่งในสายพันธุ์ที่เจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตที่มีคุณภาพ คือ พันธุ์ไพลิน พบว่ามีการปลูกมากในภาคตะวันออก โดยส่วนใหญ่มักปลูกในจังหวัด ราชบุรี ฉะเชิงเทรา และจันทบุรี จากข้อมูลการผลิตเมล่อนในประเทศไทย ปริมาณผลผลิตของเมล่อน และผลตอบแทนสุทธิต่อกิโลกรัมของเมล่อนเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ ปริมาณผลผลิต และผลตอบแทนสุทธิต่อกิโลกรัม หลังปี 2549 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงปี 2557 แสดงให้เห็นว่าปริมาณผลผลิตที่เพิ่มขึ้นอาจมีแนวโน้มมาจากการเพาะปลูกเมล่อนเพิ่มขึ้น จึงคาดการณ์ได้ว่าเมล่อนเริ่มเป็นที่ต้องการของตลาด เนื่องจากผลตอบแทนที่สูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นอีกในอนาคต (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2549) เมล่อนโดยทั่วไปนิยมบริโภคผลสด แต่เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันรองรับการเติบโตในอนาคต การสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์และการควบคุมต้นทุนการผลิตจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเมล่อนสดอาจทำได้โดยการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เมล่อนลอยแก้ว หรือน้ำเมล่อนเข้มข้น แต่การผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีสัดส่วนของเสียอยู่จำนวนมาก ทั้งนี้ของเสียส่วนใหญ่จะอยู่ในขั้นตอนการแปรรูป ดังนั้นการใช้วิธีการดำเนินธุรกิจแบบเดิมที่คิดเฉพาะภายในขอบเขตเล็กๆ อาจทำให้ไม่สามารถแข่งขันและอยู่รอดได้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงโซ่คุณค่า (Value chain) ของเมล่อน และศึกษาต้นทุนและผลตอบแทน เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนา และปรับปรุงประสิทธิภาพ อีกทั้งช่วยเพิ่มขีดความสามาในการแข่งขันในตลาดโลก

แนวคิดที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 แนวคิด คือ 1) แนวคิดโซ่คุณค่า เป็นแนวคิดในขอบเขตที่กว้างซึ่งครอบคลุมไปทั้งโซ่คุณค่า (Porter and Millar, 1985) ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบในการเพาะปลูกเมล่อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เมล่อนสดจนถึงการแปรรูป การจัดส่งสินค้า การตลาด และการบริการทำให้สามารถหาแนวทางการสร้างมูลค่าเพิ่มได้ 2) แนวคิดต้นทุนและผลตอบแทน คือ การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์โดยรวมทั้งค่าใช้จ่ายที่เสียไปทั้งทางตรงและทางอ้อม ผลตอบแทน คือ ผลตอบแทนที่เกิดจากผลการดำเนินงาน ในทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วยผลประโยชน์ หรือผลตอบแทนของการลงทุน และค่าเสียโอกาสของทุน จากแนวคิดต้นทุนและผลตอบแทนสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงต้นทุนและผลตอบแทนจากการปลูกเมล่อนสดของไร่เมล่อน และ ผลิตภัณฑ์แปรรูปของโรงงานได้ (พรพรรณ, 2554)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ตัวจับเวลา จำนวน 1 เครื่อง คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล จำนวน 1 เครื่อง โปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์ (Microsoft Excel 2010) จำนวน 1 ชุด โปรแกรมสำเร็จรูปไมโครซอฟท์เวิร์ด (Microsoft Word 2010) จำนวน 1 ชุด

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) เป็นข้อมูลหลักที่ใช้ในการศึกษาเพื่อให้เข้าใจในภาพรวมของการผลิตเมล่อนทั้งเมล่อนผลสด และ เมล่อนแปรรูป โดยการจัดเก็บข้อมูลผู้วิจัยจะใช้แบบสอบถาม และ การสัมภาษณ์เกษตรกร และผู้ประกอบการจากไร่และโรงงานที่เลือกศึกษา 2) ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) เป็นข้อมูลที่ใช้สนับสนุนเพื่อความสมบูรณ์ของการศึกษา โดยเก็บรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมจากการค้นคว้าเอกสารงานวิจัยจากสถาบันการศึกษาต่างๆ เช่น มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เป็นต้น และข้อมูลจากรายงานของหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมส่งเสริมการเกษตร กรมวิชาการเกษตร เป็นต้น

การวิเคราะห์ข้อมูล

1) วิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive analysis) เป็นการวิเคราะห์โซ่คุณค่าเมล่อน โดยนำข้อมูลปฐมภูมิ และทุติยภูมิที่ได้มาทำการวิเคราะห์สภาพทั่วไปของการผลิตเมล่อน ตั้งแต่การเพาะปลูก การดำเนินงานแปรรูปเมล่อนผลสดเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ การจัดส่งสินค้า การตลาด และการบริการ โดยอาศัยทฤษฎีโซ่คุณค่า (Porter and Millar, 1985) ในการวิเคราะห์ และ วิเคราะห์แนวทางการสร้างมูลค่าเพิ่มในกิจกรรมการผลิตและการแปรรูปที่มีสัดส่วนของเสียอยู่จำนวนมาก 2) วิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis) เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน โดยคำนวณต้นทุนและผลตอบแทนของผู้ที่เกี่ยวข้องจากการเก็บข้อมูลของไร่เมล่อนตัวอย่าง และ โรงงานตัวอย่าง เพื่อให้ทราบถึงมูลค่าและผลตอบแทนที่แท้จริง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์โซ่คุณค่าเมล่อนเชิงพรรณนา โดยอาศัยทฤษฎีโซ่คุณค่าของ Porter and Millar (1985) ในการวิเคราะห์

กิจกรรมหลัก (Primary activities) เป็นกิจกรรมที่มีผลโดยตรงต่อการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์เมล่อน แบ่งออกเป็น 6 กิจกรรมได้แก่

1) กิจกรรมก่อนการเก็บเกี่ยว (Pre-harvest) ประกอบด้วย 1.1) โลจิสติกส์ขาเข้า (Inbound logistics) เป็นการได้มาซึ่งวัตถุดิบและวัสดุที่ใช้ในการผลิตเมล่อนสด อาทิเช่น เมล็ดพันธุ์เมล่อน ปุ๋ย ยาปราบศัตรูพืช ถุงเพาะปลูก และอื่นๆ ในการจัดหาเมล็ดพันธุ์เมล่อนเกษตรกรจะไปซื้อจากผู้แทนจำหน่ายโดยตรงที่เชื่อถือได้ ปุ๋ยและยาปราบศัตรูพืชมีหลากหลายชนิดและยี่ห้อ โดยเกษตรกรจะซื้อเมื่อต้องการใช้เท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านวันหมดอายุและมีราคาแพง อีกทั้งหากเก็บรักษาไม่ดีอาจเสียหายได้ จากข้อมูลสามารถพิจารณาได้ว่าเกษตรกรมีทางเลือกในการจัดซื้อวัตถุดิบน้อยเนื่องจากจำเป็นต้องซื้อจากผู้แทนจำหน่ายที่เชื่อถือได้ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดทำให้ไม่สามารถต่อรองราคาได้ ซึ่งถ้าหากมีหน่วยงานของรัฐมาจัดตั้งสหกรณ์สำหรับจำหน่ายวัสดุ อุปกรณ์ต่างๆ ในราคาที่ต่ำกว่าอาจทำให้เกษตรกรมีตัวเลือกมากขึ้นและส่งผลให้ต้นทุนวัตถุดิบถูกลง นอกจากนี้เกษตรกรยังไม่มีการคำนึงถึงต้นทุนการเดินทางไปซื้อวัตถุดิบ ซึ่งหากมีการวางแผนการจัดซื้อล่วงหน้าจะทำให้ลดต้นทุนทั้งในรูปตัวเงินและเวลาได้ 1.2) การเพาะปลูกเมล่อน (Cultivation) เกษตรกรจะมีการเพาะปลูกเมล่อนในโรงเรือนปิดขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 9.4x52x4.7 เมตร เพื่อป้องกันเชื้อโรคและแมลงที่เป็นศัตรูพืชโดย 1 โรงเรือนสามารถปลูกได้ 1,500 ต้น ให้ผลผลิตประมาณ 2,000 กิโลกรัม การเพาะปลูกจะเริ่มตั้งแต่การเตรียมโรงเรือนโดยมีการไถดินในโรงเรือนให้เป็นร่อง บริเวณที่วางถุงเพาะปลูกจะสูงกว่าร่องเพื่อไม่ให้เกิดบริเวณน้ำขัง ต่อมามีการ

เตรียมดิน ดินที่ใช้เป็นดินที่มีค่าความเป็นกรด pH 6.0-6.8 ผสมกับทรายและขุยมะพร้าวบรรจุลงในถุงเพาะปลูก จากนั้นจะเป็นการเพาะกล้าซึ่งจะแยกเพาะในโรงเรือนปิดขนาดเล็กจะเริ่มโดยการบ่มเมล็ดโดยการแช่ในน้ำสะอาดประมาณ 20 นาที จากนั้นนำเมล็ดขึ้นจากน้ำแล้วห่อด้วยกระดาษเพาะกล้าบรรจุใส่ถุงพลาสติกเก็บในที่อุณหภูมิ 28-30 องศาเซลเซียส ประมาณ 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจะนำมาเพาะโดยใช้ถาดเพาะกล้าบรรจุพีทมอสแล้วหยอดเมล็ดเมล่อนที่บ่มแล้วลงไปทับด้วยพีทมอสอีก 1 รอบ รดน้ำให้ชุ่มทุกวัน เป็นเวลา 8-10 วัน จากนั้นจะเป็นการย้ายกล้าลงถุงเพาะปลูก เริ่มให้น้ำผสมปุ๋ยจนต้นมีการเจริญเติบโตโดยเลี้ยงแขนงข้อที่ 9-12 เพื่อการผสมเกสร การผสมเกสรจะทำในช่วงเช้าเวลา 7.00-10.00 น. และฉีดพ่นยาเพื่อไม่ให้ศัตรูพืชมาทำลายต้นเมล่อนได้ จากนั้นเมื่อมีผลเมล่อนออกมาให้เห็นจำเป็นต้องเลือกแขนงที่มีผลรูปทรงไข่ ผลใหญ่และสมบูรณ์ที่สุด เมื่อได้ลูกที่ต้องการแล้วควรตัดลูกที่เหลือออกให้หมด เหลือไว้เพียง 1 ผลต่อ 1 ต้นเท่านั้น และมีการปรับเพิ่มปริมาณการให้น้ำผสมปุ๋ยเพื่อให้ผลโตได้เต็มที่โดยวัสดุที่ใช้ในการแขวนผลจะเป็นเชือกผ้า การให้น้ำของเกษตรกรจะมีเครื่องควบคุมการให้น้ำโดยเกษตรกรเป็นผู้จัดหามาติดตั้งเอง โดยให้น้ำผสมปุ๋ยวัน 6 ครั้ง ครั้งละ 3 นาที ทำให้สะดวกในการควบคุม ซึ่งการให้น้ำเป็นสิ่งสำคัญจะต้องควบคุมปริมาณอย่างดีมิฉะนั้นผลเมล่อนอาจแตกลายน้ำได้และไม่สวยส่งผลให้ขายได้ในราคาต่ำ จากข้อมูลพิจารณาได้ว่าเกษตรกรมีการวางแผนควบคุมปริมาณการให้น้ำผสมปุ๋ยเป็นอย่างดี เพื่อให้ผลสามารถขายได้ในราคาที่สูง แต่มีข้อเสียในเรื่องโรงเรือน คือ โรงเรือนมีขนาดใหญ่กว่าโรงเรือนที่เพาะปลูกเมล่อนโดยทั่วไปถึงสองเท่า เมื่อเกิดปัญหาโรคระบาดในโรงเรือนจะทำให้ควบคุมได้ยากส่งผลให้ต้องถอนต้นทิ้งทั้งโรงเรือนอาจเป็นเหตุให้เกิดต้นทุนที่เพิ่มขึ้น

2) กิจกรรมหลังการเก็บเกี่ยว (Post-harvest) 2.1) การเก็บเกี่ยวเมล่อน (Harvest) จะเก็บเกี่ยวได้เมื่ออายุประมาณ 75 วัน และมีเครื่องมือ Hand refractometer ช่วยในการวัดค่าความหวาน ประมาณ 12-13 brix จึงจะถือว่าเก็บเกี่ยวได้ เมื่อเก็บเกี่ยวเสร็จเกษตรกรจะขนย้ายไปยังโรงพักสินค้าเพื่อคัดแยกขนาดตามน้ำหนัก คือ น้ำหนักมากกว่า 1.5 กิโลกรัม เป็นเกรดพรีเมี่ยม น้ำหนัก 1-1.4 กิโลกรัม เป็นเกรด A และต่ำกว่า 1 กิโลกรัมหรือผลไม่สวยเป็นตกเกรด จากนั้นจะบรรจุโฟมตาข่ายและขนย้ายลงตะกร้าเพื่อจัดส่งสินค้าต่อไป จากข้อมูลพิจารณาได้ว่าในการเคลื่อนย้ายเมล่อนผลสดจากโรงเรือนมายังโรงพักสินค้าอาจจะทำให้มีผลเสียหายเกิดขึ้นได้ ควรมีการจัดวางผลเมล่อนสดในตะกร้าที่พอดีเพื่อไม่ให้แต่ละผลเกิดการกระแทกกัน ซึ่งถ้าหากพบผลเมล่อนเสียหายอาจจะขายได้ในราคาต่ำกว่าที่ตั้งเป้าไว้ 2.2) การจัดส่งเมล่อน (Logistics to processing plant) เกษตรกรจะมีการจัดส่งโดยรถบรรทุก 4 ล้อขนาดเล็ก โดยเกษตรกรจะขนย้ายเมล่อนสดเป็นตะกร้า ตะกร้าละ 9-10 ลูก จัดเรียงตามความเหมาะสมทำให้สามารถขนส่งต่อเที่ยวได้ในปริมาณมากและผลเมล่อนไม่เกิดความเสียหาย โดยจะทำการขนส่งไปตามเส้นทางหลัก

3) กิจกรรมการผลิตและการแปรรูป (Operations) 3.1) การรับวัตถุดิบขาเข้า (Inbound logistics) สำหรับโรงงานแปรรูปเมล่อนจะเป็นผู้ไปรับเมล่อนผลสดจากเกษตรกรถึงไร่เพราะจะซื้อได้ในราคาถูก แต่ถ้าหากไร่เมล่อนยังไม่มีผลผลิตก็จะไปรับซื้อจากกลุ่มผู้รวบรวมเมล่อน สำหรับการตรวจสอบคุณภาพจะพิจารณาจากน้ำหนักของผลเมล่อนสดซึ่งจะต้องไม่ต่ำกว่า 1.4 กิโลกรัม และลักษณะทางกายภาพผลเมล่อนสดจะต้องสมบูรณ์ไม่มีส่วนเน่าเสีย 3.2) การแปรรูป (Transformation) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปเมล่อนผลสด คือ เมล่อนลอยแก้ว ซึ่งมีส่วนประกอบของเนื้อเมล่อนและน้ำเชื่อม ขนาดบรรจุถุง 2,000 กรัม การแปรรูปจะเริ่มต้นจากการผ่าครึ่งเมล่อนผลสด ควักเมล็ดทิ้ง และใช้เครื่องมือควักเนื้อเมล่อนให้เป็นลูกทรงกลม ซึ่งจะได้เนื้อเมล่อนประมาณ

ร้อยละ 18 ของน้ำหนักเนื้อเมล่อนสด นำไปต้มและผ่านกระบวนการต่างๆ บรรจุใส่ถุงพลาสติกพร้อมน้ำเชื่อม มีการตรวจสอบและวัดค่าความหวานต่างๆ ตามมาตรฐานของโรงงานที่กำหนด ซึ่งจากข้อมูลเมล่อนผลสดร้อยละ 100 พบว่า นำไปทำเป็นเมล่อนลอยแก้วได้ร้อยละ 18 ส่วนเปลือกร้อยละ12.07 นำไปทิ้ง เมล็ดร้อยละ 7.38 นำไปทิ้ง ผลเสียร้อยละ 1.08 นำไปทิ้ง เศษเนื้อและเศษน้ำเมล่อนหลังจากควักเนื้อเมล่อนเป็นลูกทรงกลมร้อยละ 61.47 ทางโรงงานสามารถนำมาสร้างมูลค่าเพิ่มได้โดยการนำไปผสมน้ำสะอาด ปั่น แยกกากและน้ำเมล่อน แล้วผ่านกระบวนการต่างๆ จนได้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่คือ ผลิตภัณฑ์น้ำเมล่อนเข้มข้นทำให้โรงงานมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการขาย

การวิเคราะห์แนวทางการสร้างมูลค่าเพิ่ม จากข้อมูลสามารถพิจารณาได้ว่าหากมีการนำเปลือก เมล็ด และผลเสีย ที่นำไปทิ้งกลับมาสร้างมูลค่าเพิ่มได้จะสามารถสร้างรายได้เพิ่มให้กับโรงงาน เช่น ควรจะนำไปทำเป็น ปุ๋ย หรือ น้ำหมักชีวภาพ และตอนสิ้นสุดกระบวนการแปรรูปจะยังคงเหลือกากเมล่อนที่นำไปทิ้ง คิดเป็นร้อยละ 50 ของเศษเนื้อและน้ำเมล่อนหลังจากควักเนื้อเมล่อนเป็นลูกทรงกลม ซึ่งกากส่วนนี้สามารถนำไปสร้างมูลค่าเพิ่มได้ โดยอาจนำไปทำเป็นเมล่อนหยี หรือไส้ขนมโมจิ ทำให้ไม่ต้องทิ้งไปโดยสูญเปล่า จากแนวทางการสร้างมูลค่าเพิ่มจะทำให้ลดสัดส่วนของเสียในโรงงานเหลือร้อยละ 0 ได้

4) กิจกรรมการจัดส่งสินค้า (Outbound logistics) การขนส่งผลิตภัณฑ์เมล่อนลอยแก้วและน้ำเมล่อนเข้มขนจะขนส่งทางถนนโดยรถตู้บรรทุก 4 ล้อ 1.5 ตัน ขนาดบรรทุกเต็มความจุ ซึ่งจะขนส่งไปเส้นทางหลักและใช้ผู้จัดส่งสินค้าคนเดิมเป็นคนขับรถเพื่อให้คุ้นชินกับเส้นทาง ทำให้เกิดความชำนาญส่งผลให้ลดระยะเวลาในการจัดส่งสินค้า และลดโอกาสการเกิดความผิดพลาดจากการจัดส่ง

5) กิจกรรมการตลาดและการขาย (Marketing and sales) ทั้งไร่ของเกษตรกร และโรงงานแปรรูปจะมีลูกค้ารองรับ ที่เป็นลูกค้าประจำโดยจะทำการขายสินค้าให้ในราคาที่ตกลงกันไว้ ทำให้ไม่ต้องกังวลว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาจะขายไม่ได้ แต่กลับสวนทางกันคือผลิตภัณฑ์ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งสาเหตุอาจมาจากเมื่อเกษตรกรเกิดปัญหาในการเพาะปลูกไม่สามารถผลิตเมล่อนสดได้ จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อโรงงานคือโรงงานจะไม่มีวัตถุดิบในการผลิตทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่เพียงพอต่อความต้องการ ฉะนั้นการควบคุมวางแผนการผลิตตั้งแต่ต้นทางหรือตั้งแต่ไร่ของเกษตรกรจึงเป็นสิ่งสำคัญที่สุด

6) กิจกรรมการบริการ (Service) เป็นการสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า ซึ่งในส่วนของไร่ และโรงงานมีการผลิตผลิตภัณฑ์ได้ตรงตามมาตรฐานของลูกค้า จึงทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจและซื้อขายกันได้เป็นระยะเวลานานกว่า 5 ปีแล้ว แต่หากจะมีการพัฒนาให้ดีขึ้นควรจะมีการผลิตผลิตภัณฑ์ให้เพียงพอต่อความต้องการ

กิจกรรมสนับสนุน (Support activities) มีรายละเอียด ดังนี้

1) โครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) การเงินและบัญชี ในส่วนของเกษตรกรตอนเริ่มต้นจะใช้เงินส่วนตัวของเกษตรกรผู้เพาะปลูกเอง ซึ่งการเพาะปลูกเป็นได้ดีปัจจุบันยังคงทำรายได้อย่างต่อเนื่อง ในส่วนของโรงงานจะมีการกู้ยืมเงินมาลงทุนแรกเริ่ม 2,900,000 บาท ซึ่งมีการเสียดอกเบี้ย 18,000 บาท/ปี และในปัจจุบันทางโรงงานมีการทำรายได้อย่างต่อเนื่อง

2) การบริหารทรัพยากรมนุษย์ (Human resources management) ส่วนของไร่เมล่อน เนื่องจากแรงงานในปัจจุบันหายากและต้องการค่าจ้างที่สูง เกษตรกรจึงจ้างแรงงานต่างด้าวที่ไม่มีความรู้ในการปลูกเมล่อน ผลเสียคือ ต้องสอนวิธีการทำงานให้กับแรงงานทำให้เสียเวลา ผลดี คือ เกษตรกรสามารถควบคุมและออก

คำสั่งกับแรงงานได้ ในส่วนของโรงงานจะมีการจ้างแรงงานคนไทยซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้หญิง เนื่องจากมีความละเอียดในการทำงาน โดยอัตราค่าจ้างแรงงานทั้งไร่เมล่อนและโรงงาน วันละ 300 บาท

3) การพัฒนาเทคโนโลยี (Technology development) ในส่วนของไร่เมล่อน เกษตรกรมีการปรับใช้เทคโนโลยีกับเครื่องควบคุมการให้น้ำผสมปุ๋ยทำให้ผลเมล่อนไม่แตกลายน้ำ ผลิตเมล่อนได้คุณภาพ อีกทั้งเกษตรกรยังมีการคิดค้นเครื่องอบขุยมะพร้าวเพื่อฆ่าเชื้อโรคให้ตายแล้วนำขุยมะพร้าวกลับมาใช้ใหม่ ปัจจุบันยังอยู่ในระหว่างการลองผิดลองถูกของเกษตรกร ในส่วนโรงงานยังคงมีการใช้เครื่องมือและเครื่องจักรแบบกึ่งอัตโนมัติที่ยังต้องใช้คนช่วยในการทำงานอาจทำให้เสียเวลาบ้างแต่การใช้คนช่วยเครื่องจักรทำงานยังคงเหมาะสมกับสายการผลิตนี้ เพราะถ้าหากใช้เครื่องจักรอัตโนมัติทำงานอาจจะไม่คุ้มค่ากับการลงทุน

4) การจัดซื้อ (Procurement) เกษตรกรจะจัดซื้อวัตถุดิบต่างๆ จากร้านค้าที่เชื่อถือได้ โดยจะซื้อเมล็ดเมล่อนพันธุ์ไพลินในการเพาะปลูกเป็นหลัก ปุ๋ยและยาปราบศัตรูพืชจะซื้อจากร้านค้าเดียวกัน โดยเกษตรกรจะเน้นการจัดซื้อวัตถุดิบที่เคยใช้มาก่อน ทำให้รู้ข้อมูลและราคาเป็นอย่างดี ส่วนโรงงานจะมีตัวเลือกในการจัดซื้อเมล่อนสด อาจจะซื้อโดยตรงที่ไร่เมล่อน หรือ กลุ่มผู้รวบรวม ส่วนวัตถุดิบอื่นๆ เช่น น้ำตาลทราย เกลือ สามารถหาซื้อได้ง่ายตามร้านค้าทั่วไป จากข้อมูลสามารถนำมาสร้างแบบจำลองโซ่คุณค่าได้ ดังภาพ (Figure 1)

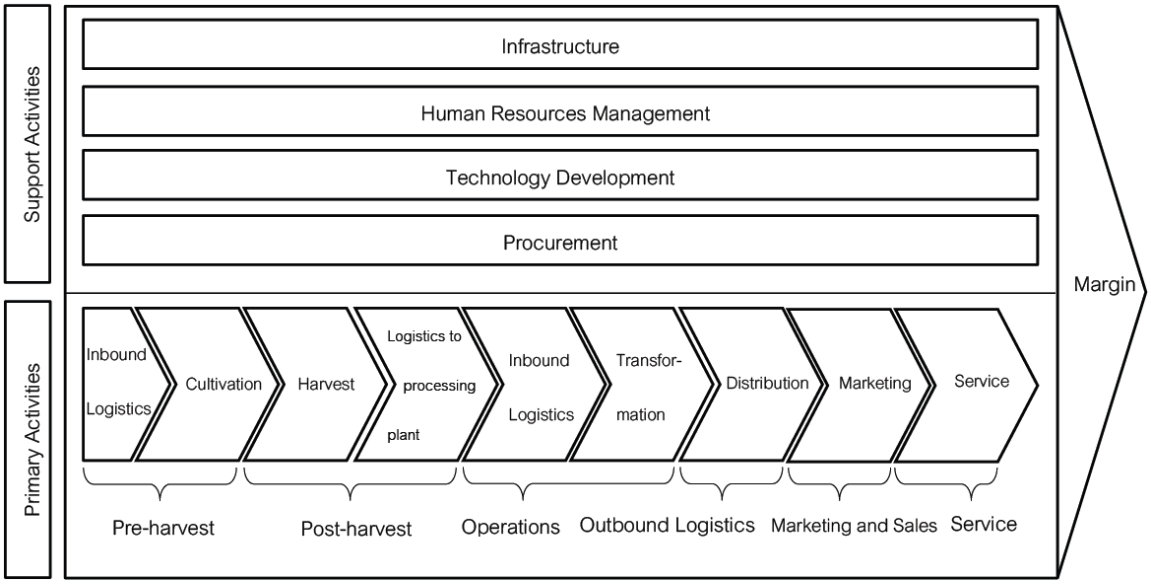


Figure 1 The Value chain of melon.

source: derivative Porter and Millar (1985)

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน

จากการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนในการปลูกเมล่อนของเกษตรกร โดยแบ่งตามประเภท ดังนี้ 1) ต้นทุนคงที่ ประกอบด้วย ค่าใช้ประโยชน์จากที่ดิน ค่าเสื่อมราคาอุปกรณ์การเกษตร 2)ต้นทุนผันแปร ประกอบด้วย ค่าเมล็ดพันธุ์เมล่อน ค่าปุ๋ย ค่ายาปราบศัตรูพืช ค่าบรรจุภัณฑ์ ค่าแรงงาน ค่าขนส่ง 3) รายได้ ประกอบด้วย รายได้จากการขายผลเมล่อนสด จากการศึกษาต้นทุนทำให้ทราบว่าต้นทุนสูงสุดอยู่ในส่วนของค่าแรงงานเนื่องจากการเพาะปลูกเมล่อนต้องดูแลอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่การเพาะกล้า เตรียมโรงเรือน ย้ายกล้าลง

โรงเรือน ตัดแต่งและผสมเกสร คัดเลือกและแขวนผล เก็บเกี่ยวคัดแยก บรรจุและขนส่ง ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นกิจกรรมที่ต้องใช้แรงงานคนในการทำงาน อีกทั้งแรงงานยังหาได้ยากในปัจจุบันจึงต้องจ้างแรงงานต่างด้าวที่ไม่มีความรู้ในการเพาะปลูกเมล่อนทำให้เสียเวลาในการสอนวิธีการดำเนินงานต่างๆ ส่งผลให้มีต้นทุนสูงถึง 26.16 บาทต่อกิโลกรัม รองลงมาเป็นต้นทุนวัตถุดิบ จำพวกเมล็ดพันธุ์ ปุ๋ย ยาปราบศัตรูพืช บรรจุภัณฑ์ และอื่นๆ ต้นทุน 15.72 บาทต่อกิโลกรัม ที่เหลือเป็นค่าขนส่ง 1.12 บาทต่อกิโลกรัม และผลตอบแทน 22 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งได้จากการขายเมล่อนสด ในราคา 65 บาทต่อกิโลกรัม

จากการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนในโรงงานแปรรูปพบว่า ต้นทุนสูงสุดอยู่ในส่วนของต้นทุนทางตรง แบ่งได้เป็น ค่าวัตถุดิบทางตรงร้อยละ 20.57 และ ค่าแรงงานทางตรงร้อยละ 14.64 รองลงมาเป็นต้นทุนทางอ้อม ค่าวัตถุดิบร้อยละ 3.66 ค่าไฟฟ้าเครื่องจักรร้อยละ 1.05 ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักรร้อยละ 16.91 ค่าน้ำร้อยละ 1.52 ค่าขนส่งร้อยละ 0.32 และ อื่นๆร้อยละ 1.68 และทำให้ทราบสัดส่วนของเสียในโรงงานที่สามารถนำไปสร้างมูลค่าเพิ่มได้ คือ ร้อยละ 20.53 สามารถนำไปทำน้ำหมักชีวภาพ และ ร้อยละ 30.74 สามารถนำไปทำเป็นไส้ขนมโมจิ หรือ เมล่อนหยีได้ (Table 1) โดยทางโรงงานแปรรูปมีผลตอบแทนเพิ่มขึ้นจากการขายของเสียที่เป็นเปลือก เมล็ด และผลเสีย ให้ผู้ประกอบการทำน้ำหมักชีวภาพ และขายกากเหลือทิ้งจากผลิตภัณฑ์น้ำเมล่อนเข้มข้นให้กับโรงงานทำขนมโมจิในราคา 10 บาทต่อกิโลกรัม (Table 2)

Table 1 Percentage of melon products

<table>
<tr><td>Farmer</td><td colspan="7">The factory</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Melon</td><td>Melon Loi-Keaw product</td><td colspan="2">Concentrated melon syrup</td><td colspan="4">Waste</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Scoop of melons</td><td>Melon scrap</td><td>Melon syrup scrap</td><td colspan="3">Bio-fermentation</td><td rowspan="3">Total</td><td>sweet cream in mochi cake or melon yee</td></tr>
<tr><td rowspan="2">52.50%</td><td rowspan="2">8.97%</td><td>Skin</td><td>Seeds</td><td>Melon waste</td><td>Waste of concentrated melon syrup</td></tr>
<tr><td>12.07%</td><td>7.38%</td><td>1.08%</td><td rowspan="2">30.74%</td></tr>
<tr><td>100%</td><td>18%</td><td colspan="2">61.47%</td><td colspan="3">20.53%</td><td>100%</td></tr>
</table>

Table 2 Cost and returns of melon products.

Participant	Products	Cost (baht/kg.)	Selling price (baht/product)	Returns (baht/product)	Waste returns (baht/kg.)
Farmer	Melon	43	65	22	-
The factory	Melon Loi Keaw	238	270	32	10
	Concentration melon syrup	126	140	14	

สรุป

โซ่คุณค่าสามารถนำมาวิเคราะห์แยกกิจกรรมทำให้เข้าใจถึงบทบาทของแต่ละหน่วยงานปฏิบัติการว่าจะมีส่วนร่วมในการสร้างมูลค่าเพิ่มอย่างไร ทำให้สามารถสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันของสินค้า และทำให้ดำเนินธุรกิจอยู่รอดในระยะยาวได้ (ฉัฐยา, 2553) ต้นทุนและผลตอบแทนสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาต้นทุนที่แท้จริง และสามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ได้หากต้องการปรับปรุงกระบวนการที่เกิดต้นทุนสูงสุด โดยเกษตรกรผู้เพาะปลูกเมล่อนยังขาดแคลนทางด้านแรงงาน ปัจจัยการผลิต และความรู้ในการเพาะปลูก จึงส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนและผลตอบแทน ในส่วนของโรงงานมีการนำเปลือก เมล็ด ผลเสียที่มีอยู่ร้อยละ 20.53 นำไปทำเป็นน้ำหมักชีวภาพ และกากเหลือทิ้งจากผลิตภัณฑ์น้ำเข้มข้น ร้อยละ 30.74 นำไปทำเป็นไส้ขนมโมจิ หรือเมล่อนหยีได้ ทำให้สัดส่วนของเสียในโรงงานแทบจะเป็นศูนย์ และทำให้ได้ผลตอบแทนเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณไร่เมล่อนของเกษตรกรในจังหวัดฉะเชิงเทรา และโรงงานแปรรูปเมล่อนในจังจันทบุรี ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลของงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ฉัฐยา ตวงสุวรรณ. 2553. **แนวทางการสร้างมูลค่าเพิ่มในห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมข้าวไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

พรพรรณ ต่อสัมพันธ์ดี. 2554. **การวิเคราะห์โซ่คุณค่าของอ้อย กรณีศึกษาอำเภอแก้งสนามนาง จังหวัดนครราชสีมาปีการเพาะปลูก 2552/2553**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. **ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร**. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/main.php?filename=index, 1 ตุลาคม 2558.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2549. **ศูนย์บริการข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร**. แหล่งที่มา: http://infoservice.oae.go.th/, 8 ตุลาคม 2558.

Porter, E.M. and V.E. Millar. 1985. How information gives you competitive advantage. **Harvard Business Review** 63 (4): 149.

การพัฒนาเครื่องมือสำหรับทดสอบพฤติกรรมการจุดติดไฟของวัสดุ

A Development of Ignition Behavior of Materials Testing Apparatus

วรวิช มณฑาทิพย์[1] และ ณัฐศักดิ์ บุญมี [1*]

Worawit Monthathip[1] and Nathasak Boonmee [1*]

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องทดสอบ Cone Calorimeter ตามมาตรฐาน ASTM 1354 โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ภายในประเทศ เครื่อง Cone Calorimeter ที่พัฒนาขึ้นได้นำไปทดสอบการจุดติดไฟแบบ Piloted ของไม้ MDF ความหนา 6 มิลลิเมตร ผลการทดสอบที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากเครื่องทดสอบการจุดติดไฟซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของไม้ MDF ที่ได้จากงานวิจัยนี้แตกต่างจากค่าที่ได้จากเครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ เท่ากับ 11% ในการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของเวลาการจุดติดไฟซึ่งแปรผกผันกับฟลักซ์ความร้อนที่ตกกระทบผิววัตถุ โดยแบ่งช่วงข้อมูลที่พิจารณาในลักษณะ piecewise linear พบว่า ค่าความแตกต่างของข้อมูลสองชุดในเทอมค่า Root Mean Square (RMS) ที่ฟลักซ์ความร้อนมากกว่า 20 kW/m^2 ซึ่งชิ้นทดสอบจะจุดติดไฟอย่างรวดเร็วก่อนเกิดชั้นถ่านที่ผิวหน้าชิ้นทดสอบ มีค่า RMS เท่ากับ 17.23 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลทั้งสองชุดเป็นไปในแนวทางเดียวกันอย่างดี แต่เมื่อฟลักซ์ความร้อนมีค่าลดลงน้อยกว่า 20 kW/m^2 พบว่ามีชั้นถ่านจำนวนมากเกิดขึ้นที่ผิวหน้าชิ้นทดสอบก่อนเกิดการจุดติดไฟ ความหนาของชั้นถ่านเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้ยากส่งผลให้ค่า RMS มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 219.55 ค่า RMS ที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกันที่ลดลง

ABSTRACT

This paper presents a development of a cone calorimeter according to ASTM 1354 standard based on materials found locally in domestic. The developed cone calorimeter was used to test piloted ignition of MDF 6 mm thickness samples and comparing the results with a cone calorimeter imported from aboard. The experimental results showed that a percent difference for the critical heat obtained from the developed apparatus and imported apparatus was 11%. For the relation of ignition time which is inverse proportional to a incident heat flux, two sets of test data were compared based on piecewise linear correlation. The Root Mean Square (RMS) was used to determine the correlation of the two set of data. The study found that for an incident heat flux more than 20 kW/m^2, no char layers formed in front of the sample surface before ignition occurred. The RMS was 17.23 indicating that the two set of data were well correlated. When an incident heat flux decreased below 20 kW/m^2, significant char layer formed in front of the sample surface before ignition occurred. The thickness of char layer at low incident heat flux before ignition occurred was uncontrollable resulting that the RMS increased to be 219.55 The higher RMS value indicated that the two sets of data were less correlated at low incident heat flux.

Key Words: piloted ignition, cone calorimeter, ASTM E1354

[*]Corresponding author; e-mail address: **fengnab@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

คำนำ

อัคคีภัยหรือเพลิงไหม้เป็นภัยที่มีการสร้างความสูญเสียทั้งแก่ชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมหาศาล ตลอดจนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งสภาพทางจิตใจของผู้ที่ประสบเหตุ จากสถิติของกรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย (กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย, 2556) พบว่าอัตราการเกิดเหตุอัคคีภัยภายในประเทศไทยเฉพาะในปี พ.ศ. 2553 ทั้งสิ้น 1,903 ครั้ง มีผู้เสียชีวิต 29 คน ทรัพย์สินเสียหายเป็นมูลค่ารวม 1.28 พันล้านบาท โดยในจำนวนนี้เป็นเหตุอัคคีภัย 149 ครั้ง ซึ่งเกิดขึ้นกับอาคารพาณิชย์ โรงแรม ห้างสรรพสินค้า และอาคารสูง โดยส่วนใหญ่เป็นอาคารมีคนใช้เป็นจำนวนมาก ถึงแม้ว่าในปัจจุบันประเทศไทยจะมีกฎหมายและมาตรฐานการป้องกันอัคคีภัยที่ได้รับการพัฒนามากขึ้น แต่จากสถิติดังกล่าวสามารถบ่งชี้ได้ว่าอัตราการเกิดอัคคีภัยภายในประเทศนั้นยังมีสูงอยู่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการควบคุมดูแลระบบค วามปลอดภัยด้านอัคคีภัยให้เป็นไปตามข้อกำหนดยังทำได้ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ

การทดสอบพฤติกรรมการจุดติดไฟของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างและตกแต่งภายในอาคารเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการลดการเกิดอัคคีภัยในประเทศไทย เนื่องจากผลจากการทดสอบนี้ทำให้ทราบถึงระดับความอันตรายทางอัคคีภัยของวัสดุต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปสู่การเลือกใช้วัสดุในการก่อสร้างและตกแต่งภายในอาคารได้อย่างเหมาะสม การทดสอบพฤติกรรมการจุดติดไฟและการเผาไหม้ของวัสดุสามารถดำเนินการได้โดยเครื่อง Cone calorimeter ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E1354 (American society for testing and materials) อย่างไรก็ตามเครื่อง Cone calorimeter ในประเทศไทยยังเป็นเครื่องมือที่ขาดแคลนอย่างยิ่ง การนำเข้าเครื่อง Cone calorimeter จากต่างประเทศนั้นยังคงมีราคาที่สูงมาก ราคาโดยประมาณไม่ต่ำกว่า 3 ล้านบาท (www.fire-testing.com) ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของเครื่องมือ Cone calorimeter นี้และได้ทำการพัฒนาเครื่องมือโดยทำการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ต่างๆที่สามารถหาได้ภายในประเทศให้มากที่สุด เพื่อทำให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องมือทดสอบลดลง อย่างไรก็ตามเพื่อให้เครื่อง Cone Calorimeter ที่กำลังพัฒนาสามารถทำงานได้เทียบเคียงกับเครื่องมือนำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอเสนอโครงการวิจัยนี้เพื่อพัฒนาเครื่องทดสอบพฤติกรรมการจุดติดของวัสดุนี้ ในต่างประเทศโดยเฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมการจุดติดไฟและการเผาไหม้ของวัสดุเป็นจำนวนมาก ดังแสดงตัวอย่างในรายงานของ (Janssens,1991), (Atreya,1998), (Babrauskas, 2002) สำหรับพฤติกรรมการจุดติดไฟของไม้และ (Tewarson,1995) สำหรับการเผาไหม้ของวัสดุสังเคราะห์ เช่น พลาสติก และวัสดุจากธรรมชาติเช่น ไม้ภายใต้สภาวะเพลิงไหม้สำหรับการเผาไหม้ของวัสดุสังเคราะห์ นักวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการจุดติดไฟและการเผาไหม้ของไม้หลายชนิดด้วย Cone calorimeter ตัวอย่างเช่น (Suuberg,1994) ได้ศึกษาพฤติกรรมการจุดติดไฟของไม้และผลิตภัณฑ์จากเซลลูโลส (cellulosic material) (Quintiere. Harkleroad, 1984) ได้ศึกษาพฤติกรรมการจุดติดไฟและการลามไฟของ ไม้อัด (plywood) และ ผลิตภัณฑ์จากเซลลูโลสอีกหลายชนิด (Spearpoint. Quintiere) ได้ศึกษาการจุดติดไฟแบบไพล็อต (piloted ignition) และการเผาไหม้ของไม้ 4 ชนิดประกอบด้วย redwood, red oak, douglas fir, maple, และ (Boonmee. Quintiere) ได้ทำการศึกษาการจุดติดไฟด้วยตัวเอง (auto ignition) ของไม้ redwood เป็นต้น กระบวนการจุดติดไฟและการเผาไหม้ของไม้เมื่อไม้ได้รับความร้อนจากฟลักซ์ความร้อนภายนอก ไม้จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอเชื้อเพลิง (fuel gas) และเถ้าถ่านที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (residual) กระบวนการที่ไม้เปลี่ยนสภาพเนื่องจากความร้อน เรียกว่า

กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis process) หรือ กระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน อัตราการเกิดไพโรไลซิสของไม้จะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดไพโรไลซิสจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็ กโปเน็นเชียล (exponential rate) ซึ่งทำให้อัตราการเกิดไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง

ในประเทศไทยการศึกษาพฤติกรรมการจุดติดไฟของวัสดุยังมีจำนวนน้อย ตัวอย่างของงานวิจัยมีดังนี้ เช่น การทดสอบพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ auto-ignition ของไม้ (อรรถพร, 2551) และแบบ Piloted ของผลิตภัณฑ์จากไม้ (ศิริเวทย์, 2553) และพลาสติก (กิตติ, 2554) ผลจากงานวิจัยนี้ที่สำคัญประกอบด้วย ฟลักซ์ความร้อนวิกฤตสำหรับการจุดติดไฟ สามารถใช้เป็นดัชนีสำหรับลำดับความเสี่ยงภัยจากอัคคีภัยของ ไม้ผลิตภัณฑ์จากไม้ และพลาสติกที่ใช้ในงานก่อสร้างและตกแต่งอาคารภายในประเทศ

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาพฤติกรรมการจุดติดไฟของวัสดุสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบพฤติกรรมการจุดติดไฟที่พัฒนาขึ้น (Cone calorimeter) โดยวิธีการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM E1354 ใน Figure 1 และ Figure 2 การทดสอบกระทำโดยการนำชิ้นวัสดุทดสอบขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่เกิน 10x10 ตารางเซนติเมตรรับฟลักซ์ความร้อน (radiant heat flux) จากแผงโคนความร้อน (Cone heater) ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะการแผ่รังสีความร้อนที่วัตถุได้รับขณะเกิดเพลิงไหม้ เมื่อชิ้นวัสดุทดสอบได้รับฟลักซ์ความร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นจนถึง อุณหภูมิติดไฟ (ignition temperature) วัตถุสามารถจุดติดไฟได้โดยการอาศัยการเหนี่ยวนำจากเปลวไฟขนาดเล็กเรียกว่า เปลวไฟไพล็อต (piloted flame) เมื่อฟลักซ์ความร้อนที่ตกกระทบผิววัตถุลดลง เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟของวัตถุจะเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ความร้อนต่ำที่สุดที่วัตถุสามารถจุดติดไฟได้ เรียกว่า ฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (critical heat flux)

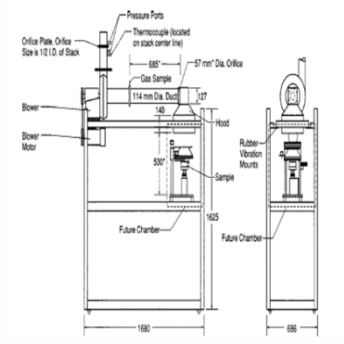


Figure 1 Cone calorimeter (ASTM E1354)

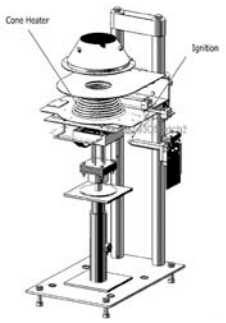


Figure 2 Enlargement of a Cone heater and Ignition

ในการทดสอบพฤติกรรมการจุดติดไฟและการเผาไหม้ของวัสดุ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบประกอบด้วย

1.เวลาจุดติดไฟ (ignition time)

2.ฟลักซ์ความร้อน (heat flux)

อุปกรณ์สำคัญของเครื่อง Cone calorimeter ประกอบด้วยชุดขดลวดความร้อน Cone heater และอุปกรณ์ควบคุมเครื่อง และระบบ Smoke exhaust hood โดยในส่วนนี้ได้ดำเนินการพัฒนาชุดขดลวดให้ความร้อน Cone heater ใน Figure 3 และ ชุดโต๊ะรวมถึงระบบระบบ Smoke exhaust hood ใน Figure 4



Figure3 Cone heater and ignition

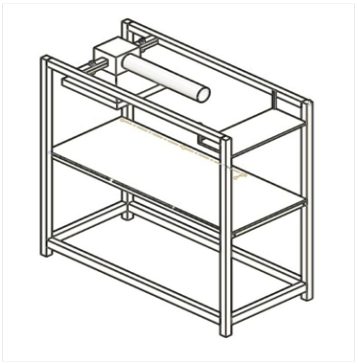


Figure4 Table and smoke exhaust hood system

ผลและวิจารณ์

เนื่องจากพื้นที่ในการนำเสนอบทความมีจำกัด บทความฉบับนี้จึงนำเสนอผลการทดลองเฉพาะผลิตภัณฑ์แผ่นใยไม้อัดชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDF) ความหนา 6 มิลลิเมตรใน Figure 5 ผลที่ได้จากการทดลองจะประกอบไปด้วย ฟลักซ์ความร้อนวิกฤติและเวลาการจุดติดไฟแบบ piloted ใน Table 1 ซึ่งผู้เขียนอยากให้เห็นความแตกต่างระหว่างเครื่องมือทดสอบพฤติกรรมการจุดติดไฟของวัสดุที่พัฒนาขึ้นกับงานวิจัย (ศิรเวทย์, 2553) บทความฉบับนี้จึงนำเสนอผลของการเปรียบเทียบ ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง root mean squared (rms)

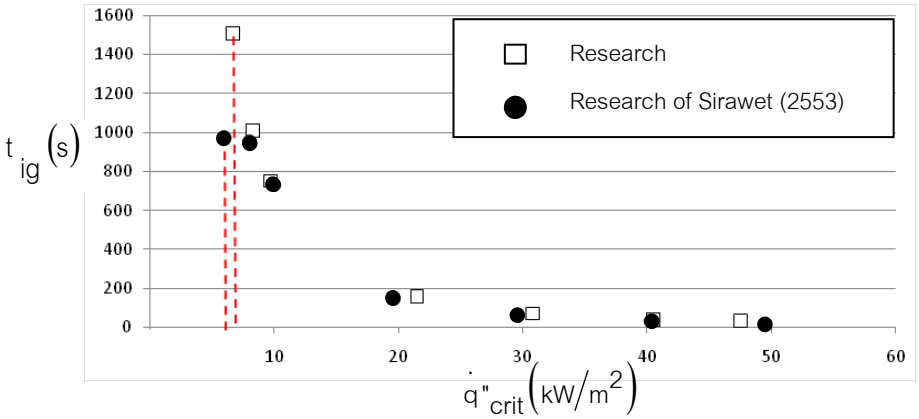


Figure 5 Relations between ignition time and heat flux of wood MDF thickness 6 mm.

Table 1

Wood	Research (kW/m^2)	Research of Sirawet (kW/m^2)	Percent error
MDF (6mm)	6.7	6	11.02

ผลการทดลองของการจุดติดไฟและฟลักซ์ความร้อนวิกฤติสำหรับการจุดติดไฟแบบ piloted ของเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นกับงานวิจัย (ศิรเวทย์, 2553) จาก Figure 5 ฟลักซ์ความร้อนวิกฤติและเวลาการจุดติดไฟแบบ piloted จะเห็นได้ว่า แนวโน้มของกราฟฟลักซ์ความร้อนที่ใช้ในการจุดติดไฟ และ เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จึงนำมาเปรียบเทียบหาค่าความแตกต่างระหว่างผลของเครื่องทดสอบการจุด

ติดไฟที่พัฒนาขึ้นกับงานวิจัย (ศิรเวทย์, 2553) ซึ่งการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง root mean squared (rms) (Pindyck. Rubinfeld, 1998) ได้แนะนำการหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง root mean squared (rms) จากสมการ

$$rms = \sqrt{\frac{\sum(\varepsilon^2)}{N}} \quad (1)$$

โดย ε คือ ค่าความแตกต่าง

เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นนั้นทำได้ค่อนข้างยากจึงส่งผลให้ได้ฟลักซ์ความร้อนที่ใช้ไม่เท่ากัน เวลาที่ใช้ในการจุดติดไฟจึงไม่เท่ากัน ในการเปรียบเทียบกันนั้นต้องกำหนดกราฟใหม่ให้เป็นกราฟเส้นตรงของแต่ละช่วงฟลักซ์ความร้อน (piecewise linear) โดยนำ Figure 5 มาสร้างกราฟใหม่เพื่อที่จะเปรียบเทียบกันได้ ในการหาค่ากึ่งกลางของกราฟ (midpoint) จากสมการ โดยนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการเส้นตรงจากเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นและ งานวิจัย (ศิรเวทย์, 2553) เพื่อหาค่า rms โดยจะทำการแบ่งค่าออกเป็น 2 ช่วง ดัง Table 2 และกราฟเส้นตรงแต่ละช่วง ฟลักซ์ความร้อน (piecewise linear) ของวัสดุทดสอบแสดงใน Figure 6

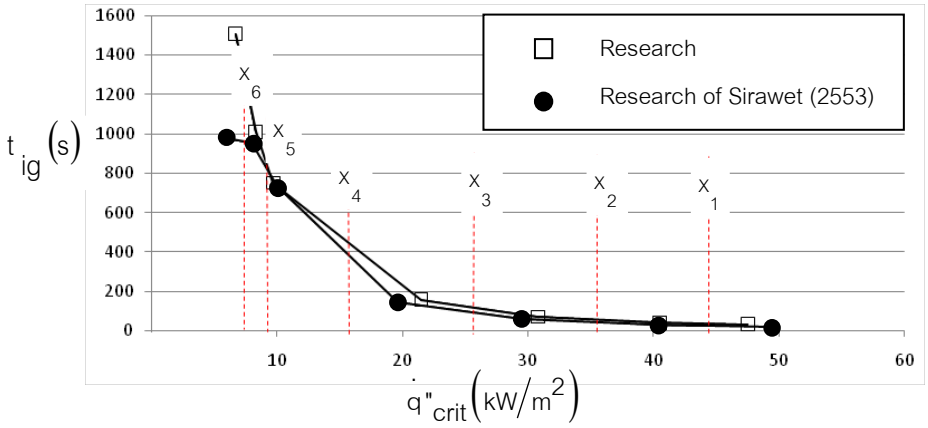


Figure 6 Graph piecewise linear of wood MDF thickness 6 mm.

Table 2

Range of heat flux (kW/m^2)	Midpoint	Research	Research of sirawet	$\square = (y - y')^2$
40-50	$x_1 = 44.45$	y = -1.2143X + 90.345	y′ = -1.087X + 74.804	97.66
30-40	$x_2 = 35.30$	y = -3.1615X + 169.21	y′ = -2.834X + 145.25	153.74
20-30	$x_3 = 25.38$	y = -9.319X + 358.86	y′ = -8.4667X + 311.95	639.01
sum				890.41
average				296.80
root mean square				17.23
15-20	$x_4 = 15.20$	y = -50.155X + 1236.80	y′ = -61.146X +1344.50	3523.99
10-15	$x_5 = 9.00$	y = -185X + 2544.80	y′ = -110.33X + 1836.30	1330.06
5-10	$x_6 = 7.25$	y = -310.94X + 3590.10	y′ = -11X + 1041.70	139752.61
sum				144606.66
average				48202.22
root mean square				219.55

สรุป

จากผลการทดลองของผลิตภัณฑ์จากไม้ที่ได้จากเครื่องมือสำหรับทดสอบพฤติกรรมการจุดติดไฟ แบบ piloted ของ เครื่องมือทดสอบการจุดติดไฟของวัสดุที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ได้นำไปใช้ทดสอบการจุดติดไฟแบบ piloted ของวัสดุทดสอบแผ่นใยไม้อัดความหนาแน่นชนิดปานกลาง (MDF) หนา 6 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบเมื่อนำไปเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากเครื่องทดสอบการจุดติดไฟซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ ผลจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่หาได้จากงานวิจัยนี้จะแตกต่างจากค่าที่หาได้จากเครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศเป็น 11 % สำหรับไม้ MDF ในการเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ของ เวลาการจุดติดไฟซึ่งแปรผกผันกับฟลักซ์ความร้อนที่ตกกระทบ ผิววัตถุ โดยแบ่งช่วงข้อมูลที่พิจารณาในลักษณะ piecewise linear การเปรียบเทียบกันนั้นได้อาศัยหลักการทางวิชาสถิติ โดยใช้วิธีการหาความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง root mean square (rms) จากงานวิจัยของ (Spearpoint,2001) ได้ทดลองแล้วว่าที่ heat flux น้อยกว่า 20 kW/m^2 วัสดุทดสอบไม้จะกลายเป็นถ่านก่อนการจุดติดไฟจะเกิดขึ้น ซึ่งปริมาณการกลายเป็นถ่านของไม้ไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากเป็นวัสดุธรรมชาติ ดังนั้นความหนาของถ่านมีผลโดยตรงกับการจุดติดไฟ ในบางครั้งถ่านที่เกิดขึ้นอาจจะเปลี่ยนไปเป็นขี้เถ้าจึงทำให้คุณสมบัติของไม้เปลี่ยนแปลงไป แต่ที่ heat flux มากกว่า 20 kW/m^2 วัสดุทดสอบไม้จะจุดติดไฟอย่างรวดเร็วก่อนเกิดชั้นถ่าน จากการทดลอง สำหรับไม้ MDF มีค่า rms เท่ากับ 219.55 ที่ heat flux น้อยกว่า 20 kW/m^2 และมีค่า rms เท่ากับ 17.23 ที่ heat flux มากกว่า 20 kW/m^2 สาเหตุที่ทำให้ค่า rms มีค่าสูงในช่วง heat flux น้อยกว่า 20 kW/m^2 เนื่องจากพบว่ามีชั้นถ่านจำนวนมากเกิดขึ้นที่ผิวหน้าชิ้นทดสอบก่อนเกิดการจุดติดไฟ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณทำวิจัย เลขที่ทุนวิจัย 56/04/ME ในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. 2556. แหล่งที่มา: http://www.disaster.go.th/dpm/

กิตติ ภูษณะเบญญา และณัฐศักดิ์ บุญมี. 2554. การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Piloted ของผลิตภัณฑ์จากพลาสติก. **การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่** 49 **มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**.

ศิรเวทย์ จรัสปรดีดาลาภ และณัฐศักดิ์ บุญมี. 2553. การศึกษาเชิงทดลองพฤติกรรมการจุดติดไฟแบบ Piloted ของผลิตภัณฑ์จากไม้. **การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่** 48 **มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**.

อรรถพร สุกลสม และณัฐศักดิ์ บุญมี. 2551. การศึกษาเชิงทดลองการเกิดไพโรไลซิส ของไหม้. **วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. ฉบับที่ (65) (สิงหาคม-ตุลาคม 2551).

ASTM E1354, Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter. 2004. **American Society for Testing and Materials**: West Conshohocken, PA.

Atreya, A.1998. Ignition of Fire. **Philosophical Transaction of the Royal Society of London**. Vol (356): 2787-2813.

Babrauskas, V. 2002. Ignition of wood: A Review of the State of the Art. **Journal of Fire Protection Engineering**, Vol (12): 163-189.

Boonmee, N. and J.G. Quintiere. 2002. Glowing and Flaming Auto-Ignition of Wood. **Twenty-Ninth Symposium (International) on Combustion**. Vol (29): 289-296.

Boonmee, N. and J.G. Quintiere. 2005. Glowing Ignition of Wood: The Onset of Surface Combustion. **Thirtieth Symposium (International) on Combustion**. Vol (30): 2303-2310.

Boonmee, N. and J.G. Quintiere. A Theoretical Investigation of Surface Glowing Ignition Leading to Gas Flaming Ignition. **Fire Safety Science Proceedings of the Eighth International Symposium**. Vol (8): 139-150.

Fire Testing Technology. 2013. **Cone Calorimeter**. แหล่งที่มา: www.fire-testing.com

Janssens, M., 1991. Piloted Ignition of Wood: A Review. **Fire and Materials** Vol (15): 151-167.

Pindyck and Rubinfeld. 1998. **Econometric models and economic forecasts** (4 editions)

Quintiere, J.G. and M. Harkleroad. 1984. New Concepts for Measuring Flame Spread Properties. **National Bureau of Standards.**

Suuberg, E.M., I. Milosavljevic, and W.D. Lilly. 1994. Behavior of Charring Materials in Simulated Fire Environments. **National Institute of Standards and Technology**: Gaithersburg, Maryland.

Spearpoint, M.J. and J.G. Quintiere. 2001. Predicting the Burning of Wood Using an Integral Model. **Combustion and Flame**. Vol (123): 308-324.

Spearpoint, M.J. and J.G. Quintiere. 2001. Predicting the Piloted Ignition of Wood in the Cone Calorimeter Using an Integral Model-Effect of Species, Grain Orientation and Heat Flux. **Fire Safety Journal**. Vol (36): 391-415.

Tewarson, A. 1995. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fire. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**, P.J. DiNenno. Editor. NFPA, Quincy, MA. Vol (3): 3-35 - 3-124.

การควบคุมรอบเดินเบาเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลงร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ ด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซี่

Idle Speed Control of Dual Fuel Diesel Engine with Natural Gas using Fuzzy Controller

กิตติพงษ์ เยาวาจา[1*] และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย[2]

Kittipong Yaovaja[1*] and Withit Chatlatanagulchai[2]

บทคัดย่อ

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเครื่องยนต์ดีเซลที่ถูกดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงดีเซลเดิม เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้นไม่ได้ถูกดัดแปลงกลไกของเครื่องยนต์ทำให้เครื่องยนต์ยังคงมีกำลังอัดสูง ซึ่งมีความทนทานและมีประสิทธิภาพเครื่องยนต์สูง แต่จะใช้ระบบควบคุมที่มีซับซ้อนเพียงพอเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์อย่างเหมาะสม โดยระบบควบคุมเครื่องยนต์นั้นมีหลายประเภทซึ่งประสิทธิภาพแตกต่างกันออกไป เนื่องจากการทำงานที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถควบคุมได้ทั้งการทำงานของหัวฉีดดีเซลทั้ง 4 หัวฉีด และหัวฉีดก๊าซธรรมชาติอีก 4 หัวฉีด ทำให้สามารถควบคุมเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ทดลองดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์ดีเซลโตโยต้า รหัส 2KD-FTV (VNT) แบบ 4 สูบ ขนาดความจุ 2.5 ลิตร โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดลองการควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ดังกล่าวโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่ เพื่อปรับระยะเวลาการเปิดของหัวฉีดดีเซล ซึ่งสามารถควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ได้เป็นอย่างดี

ABSTRACT

Dual Fuel Diesel engine with natural gas is a modified Diesel engine in order to replace the conventional Diesel fuel with the alternative fuel. Because the mechanical system of the engine is not modified and the engine still has high compression ratio, the engine robustness and the engine efficiency are high. On the other hand, the engine needs a sophisticated controller that generates appropriate control command. There is a numerous of the controller which gives difference performance due to variation in operating method. In this research, electronic control unit was applied to control both four Diesel injectors and four gas injectors which gave worthy control performance. The test engine was modified from a 2KD-FTV Toyota Diesel engine; 2.5 liters four-cylinder engine. This paper shows the experimental results of idle speed control by using a fuzzy controller. The proposed controller adjusted the Diesel injection duration and showed excellent control performance.

Key words: Diesel-Dual-Fuel Engine, Idle Speed Control, Fuzzy Controller

Corresponding author; e-mail address: **Kittipong@eng.src.ku.ac.th**

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

[1]Faculty of Engineering at Si Racha, Kasetsart University Sriracha campus, Chonburi, 20230

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ 10900

[2]Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

คำนำ

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง และมีความทนทานสูง เครื่องยนต์นี้จึงได้รับความนิยมในการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างมาก ซึ่งทำให้มีความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสูงมากเช่นกัน ประเทศไทยนั้นต้องนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศมหาศาล โดยในปี พ.ศ. 2556 นั้นมีมูลค่า 1.07 ล้านล้านบาทต่อปี โดยน้ำมันสำเร็จรูปที่ประเทศไทยใช้มีมูลค่า 1.33 ล้านบาทนั้นถูกนำมาใช้ในภาคขนส่งประมาณครึ่งหนึ่ง และน้ำมันดีเซลถูกนำมาใช้ในภาคขนส่งเท่ากับร้อยละ 40.21 ของเชื้อเพลิงทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) ซึ่งเป็นจำนวนเงินมหาศาลที่สูญเสียไป

การทดแทนการนำเข้าเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งมีราคาเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไม่แน่นอนด้วยการใช้ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) ที่สามารถขุดได้จากในประเทศไทยจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ โดยก๊าซธรรมชาติที่ถูกขุดขึ้นมาจากในประเทศไทยมีส่วนประกอบหลักคือ ก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 75 ก๊าซอีเทนประมาณร้อยละ 6 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 13 ซึ่งมีค่าความร้อนเฉลี่ย 34.17 MJ/Kg ซึ่งแม้มีค่าความร้อนน้อยกว่าน้ำมันดีเซลที่ค่าความร้อนเฉลี่ย 42.8 MJ/Kg แต่เนื่องจากราคาก๊าซธรรมชาติในประเทศที่ต่ำทำให้ราคาค่าเชื้อเพลิงต่ำกว่าถึงสามเท่า

ยานยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติจะถูกติดตั้งระบบก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas, CNG) หรือบางครั้งเรียกว่าก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (Natural Gas for Vehicle, NGV) ก๊าซธรรมชาตินั้นจะถูกอัดให้มีแรงดันสูงที่ประมาณ 200 บาร์ (200 เท่าของบรรยากาศ) และบรรจุภายในถังเหล็กหรือวัสดุใยแก้วผสมหรือเส้นใยคาร์บอน ก๊าซธรรมชาติจะถูกนำไปใช้โดยผ่านระบบลดแรงดัน (Pressure Regulator) หรือบางครั้งนิยมเรียกว่าหม้อต้ม เพื่อลดแรงดันให้ต่ำลงก่อนที่จะเข้าสู่เครื่องยนต์

หากจำแนกประเภทของเครื่องยนต์ดีเซลที่ดัดแปลงให้สามารถใช้ก๊าซธรรมชาติได้นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงอย่างเดียว และประเภทที่น้ำมันดีเซลร่วมกับก๊าซธรรมชาติ กรณีแรกเรียกว่า Dedicated Engine เครื่องยนต์จะถูกดัดแปลงให้กำลังอัดของเครื่องยนต์ต่ำลงให้เหมาะสมกับการใช้ก๊าซธรรมชาติ และเปลี่ยนไปใช้ระบบหัวเทียนจุดระเบิด ผลที่ตามมาคือเครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ ความทนทานของกระบอกสูบต่ำ และค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงสูง ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอเครื่องยนต์ประเภทหลังคือ เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Diesel-Dual-Fuel Engine, DDF) ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการดัดแปลงต่ำกว่า เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพและความทนทานสูง

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม ส่วนใหญ่มีหลักการทำงานคือใช้กลไกของเครื่องยนต์ดีเซลเดิมทั้งหมด ซึ่งมีอาศัยการอัดของกระบอกสูบของเครื่องยนต์ในการเผาไหม้ (Compression Ignition, CI) ซึ่งเครื่องยนต์ดีเซลปัจจุบันนิยมใช้การจ่ายเชื้อเพลิงแบบฉีดตรง (Direct Injection) คือมีหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถฉีดน้ำมันดีเซลด้วยแรงดันสูงเข้าไปภายในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ได้โดยตรง โดยเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมจะถูกติดตั้งระบบจ่ายก๊าซธรรมชาติที่มีแรงดันประมาณ 3 บาร์ เพื่อให้ก๊าซนั้นผสมกับอากาศก่อนที่จะไหลเข้าไปในกระบอกสูบของเครื่องยนต์

ความแตกต่างของระบบเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมส่วนหนึ่งอยู่ที่ระบบควบคุมเครื่องยนต์ โดยส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้ระบบควบคุมก๊าซธรรมชาติเพียงอย่างเดียว และยังคงใช้ระบบควบคุมเครื่องยนต์เดิมของรถยนต์ที่มาจากโรงงานผลิต ดังนั้นเครื่องยนต์จึงไม่สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาต่างๆนานา เช่น

การใช้อัตราส่วนก๊าซธรรมชาติต่ำซึ่งส่งผลต่อความประหยัด เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากเครื่องยนต์มีโอกาสเกิดการเสียหาย เช่น เครื่องยนต์เกิดการน็อก (Engine Knock) รวมทั้งปัญหาที่เครื่องยนต์ทำงานได้ไม่ราบเรียบ โดยปัญหาต่างๆ มีสาเหตุมาจากระบบควบคุมทำงานได้ไม่มีประสิทธิภาพที่ดีพอ

ในความเป็นจริงแล้วการเผาไหม้ภายในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีหลากหลายรูปแบบมาก โดยเมื่อใช้ปริมาณก๊าซธรรมชาติน้อยหรือจังหวะการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลที่บริเวณใกล้จุดศูนย์ตายบนของเครื่องยนต์ การเผาไหม้ของเครื่องยนต์นั้นอาจจะมีลักษณะคล้ายการเผาไหม้แบบดีเซล (Conventional Diesel Combustion) แต่จะมีประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อยเนื่องจากจะมีระยะเวลาการเผาไหม้นานมากยิ่งขึ้น และทำให้ความร้อนสะสมในเครื่องยนต์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ระบบระบายความร้อนเครื่องยนต์ต้องทำงานสูงขึ้น หรือเครื่องยนต์อาจจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ ในกรณีนี้หากเครื่องยนต์ทำงานอยู่ที่ภาระต่ำ การปรับจังหวะการฉีดน้ำมันดีเซลล่วงหน้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดมลพิษได้ (Abd Alla *et al*., 2002) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Papagiannakis *et al.* (2007) ที่ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้แบบสองโซนในเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมด้วยการฉีดน้ำมันแบบนำร่อง ซึ่งพบว่า การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ความดันในกระบอกสูบและมีมลพิษต่ำลง

หากก๊าซธรรมชาติผสมกับอากาศคลุกเคล้าอย่างดี การเผาไหม้นั้นจะมีการระยะเวลาการเผาไหม้ที่รวดเร็ว (Lee *et al*., 2003) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kusaka and Okamoto (2000) ที่แสดงผลการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) พบว่าการเผาไหม้นั้นจะมีอุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำ และอุณหภูมิไอเสียต่ำ เครื่องยนต์จึงมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนต่ำกว่าเครื่องยนต์ดีเซล นอกจากนั้นจากการวิจัยด้านการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมพบว่า การเผาไหม้มีความซับซ้อน และต้องอาศัยระบบควบคุมที่ดีเพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทำงานของเครื่องยนต์นั้นมีหลายสภาวะ ได้แก่ การเร่งความเร็ว การลดความเร็ว การรักษาความเร็วคงที่ และรอบเดินเบาเครื่องยนต์ จากการใช้งานในเมืองที่มีจราจรหนาแน่นพบว่าเครื่องยนต์จะทำงานที่สภาวะรอบเดินเบาบ่อยมากหรือราวหนึ่งในสาม การควบคุมเครื่องยนต์ดังกล่าวเพื่อให้สามารถทำงานได้ดีที่รอบเดินเบาร่วมกับก๊าซธรรมชาติได้พบได้น้อยมาก สาเหตุหนึ่งมาจากผู้วิจัยส่วนใหญ่ไม่สามารถออกแบบระบบควบคุมการฉีดน้ำมันดีเซลได้ เนื่องจากต้องควบคุมการฉีดน้ำมันดีเซลแต่ละสูบด้วยคำสั่ง (Pulse) ที่มีความเร็วสูง จำนวน 1 ถึง 3 ครั้งต่อรอบการทำงานของเครื่องยนต์ โดยแต่ละคำสั่งจะมีค่าความกว้างสัญญาณ (Pulse width) อยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 1 มิลลิวินาที นอกจากนั้นเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมมีความซับซ้อนสูง จึงเหมาะสำหรับระบบควบคุมขั้นสูง

ทีมผู้วิจัยได้พัฒนาระบบควบคุมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมหลากหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถพัฒนาระบบควบคุมที่สามารถทำงานร่วมกับระบบเครื่องยนต์เดิมได้ โดยผู้วิจัยได้พัฒนาระบบควบคุมต่างๆของเครื่องยนต์ดังกล่าว ได้แก่ ระบบทางเดินอากาศของเครื่องยนต์ (Chatlatanagulchai *et al*., 2010) ระบบป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์ (Yaovaja and Chatlatanagulchai, 2014) และระบบแรงดันน้ำมันเครื่องยนต์ (Chatlatanagulchai *et al*., 2015) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมแบบฟัซซี่ที่สามารถควบคุมรอบเดินเบาได้อย่างดี ซึ่งควบคุมแบบฟัซซี่ถูกนำมาแทนตัวควบคุมทั่วไปแบบพีไอดีเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมรอบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่และเครื่องยนต์เรือเดินทะเลเพื่อลดความไม่แน่นอนจากสิ่งรบกวนภายนอก (Lynch, 2005; Farouk, 2012; Di *et al*., 2015)

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์ดีเซลโตโยต้า รหัส 2KD-FTV (VNT) แบบ 4 สูบ ขนาดความจุ 2.5 ลิตร ซึ่งมีกำลังงานสูงสุด 106 kW ที่ 3,600 รอบต่อนาที มีแรงบิดสูงสุด 343 Nm ที่ 2,400 รอบต่อนาที อัตราส่วนกำลังอัดเครื่องยนต์ 17.4:1 โดยได้ถูกดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมแล้ว (Figure 1, Left) ซึ่งเครื่องยนต์อยู่ภายในรถพิกอัปโตโยต้ารุ่น Hilux Vigo Champ ที่ได้ติดตั้งระบบก๊าซธรรมชาติแล้ว (Figure 1, Right) ขณะทดลองอาศัยคนขับหนึ่งคน โดยระบบเชื้อเพลิงเครื่องยนต์จะถูกควบคุมด้วยระบบที่ได้ออกแบบไว้



Figure 1 (Left) Toyota 2KD-FTV (VNT), (Right) Toyota Hilux Vigo Champ

แผนภาพของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วม (Figure 2) แสดงให้เห็นอุปกรณ์ต่างๆของเครื่องยนต์ประกอบด้วยระบบทางเดินอากาศและระบบทางเดินน้ำมันเชื้อเพลิง โดยหัวฉีดก๊าซธรรมชาติจะถูกติดตั้งไว้ที่บริเวณหน้าวาล์วไอดีของแต่ละสูบ จำนวน 4 หัวฉีด โดยก๊าซธรรมชาติจะถูกจ่ายสัมพันธ์กับจังหวะการดูดอากาศของแต่ละกระบอกสูบ เพื่อให้ก๊าซไหลเข้าไปยังเครื่องยนต์ได้อย่างแม่นยำ

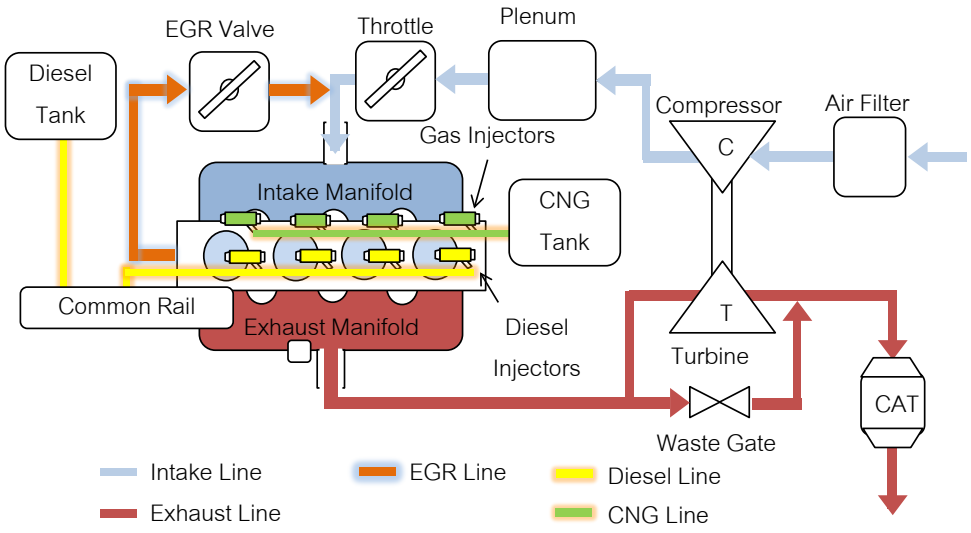


Figure 2 Schematic of air-path system and fuel-path system in the DDF engine

ชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์

งานวิจัยนี้ใช้ชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Unit, ECU) สำหรับควบคุมเครื่องยนต์ที่สามารถเขียนโปรแกรมได้โดยใช้ Engine Control Module (ECM) (Figure 3, Left) ซึ่งทีมผู้วิจัยได้พัฒนาชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Figure 3, Right) เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับระบบควบคุมเดิมของเครื่องยนต์ได้ ชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์นี้ทำหน้าที่ควบคุมสัญญาณสั่งงานของระบบเชื้อเพลิง ได้แก่ คำสั่งการฉีดของน้ำมันดีเซลทั้ง 4 หัวฉีด และคำสั่งการจ่ายก๊าซธรรมชาติทั้ง 4 หัวฉีด



Figure 3 (Left) Engine Control Module (ECM), (Right) DDF Engine Electronic Control Unit (ECU)

ระบบควบคุมรอบเดินเบาเครื่องยนต์แบบฟัซซี่

การออกแบบระบบควบคุมรอบเดินเบาสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมนั้น (Figure 4) จะมีสัญญาณอ้างอิง (Set-point) เป็นค่าความเร็วรอบเดินเบาเครื่องยนต์ที่หน่วยรอบต่อนาที (RPM) ส่วนสัญญาณป้อนกลับนั้นเป็นความเร็วรอบเครื่องยนต์ (Engine Speed) ซึ่งอ่านค่าได้จากสัญญาณจากเซนเซอร์ประเภทแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ที่ติดตั้งไว้สองจุดคือ ที่เพลาเพลาข้อเหวี่ยง (Crank Shaft) และที่เพลาลูกเบี้ยว (Cam Shaft) เมื่อนำสัญญาณอ้างอิงมาลบค่าที่อ่านได้จะได้ค่าผิดพลาด (Error) ที่ใช้ในการควบคุมรอบเดินเบา โดยสัญญาณขาเข้าของตัวควบคุมแบบฟัซซี่คือ ค่าผิดพลาด ค่าปฏิยานุพันธ์ค่าผิดพลาด

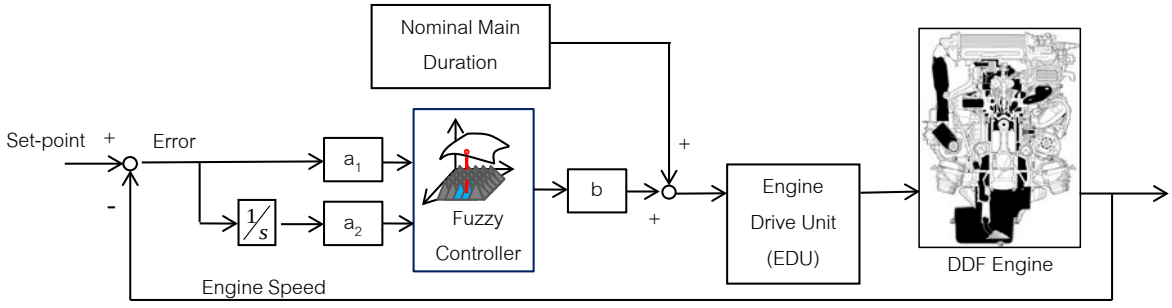


Figure 4 Idle Speed Control of DDF Engine by using Fuzzy Controller

จุดเด่นของการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่คือ ตัวควบคุมสามารถสร้างกฎการควบคุมให้สอดคล้องกับแนวคิดของมนุษย์ได้ดี ซึ่งแตกต่างกับระบบควบคุมขั้นสูงส่วนใหญ่ที่อาศัยสมการทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว เช่น เมื่อพิจารณาปัญหาในการควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์นี้ กรณีที่ระบบควบคุมมีค่าเกนน้อย การควบคุมรอบเดินเบาอาจจะช้าทำให้เครื่องยนต์ดับได้ แต่ที่สภาวะคงที่และสิ่งรบกวนน้อยรอบเครื่องยนต์จะนิ่ง แต่กลับกันในกรณีที่ระบบควบคุมมีค่าเกนมาก การควบคุมรอบเดินเบาจะทำได้เร็วเพราะเครื่องยนต์ตอบสนองไว

แต่ที่สภาวะคงที่รอบเครื่องยนต์จะแกว่ง ดังนั้นแนวคิดในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่นี้คือการปรับเกนของตัวควบคุมที่ช่วงค่าผิดพลาดต่ำให้มีค่าเกนต่ำ (เพื่อควบคุมที่สภาวะคงที่) ส่วนเมื่อมีค่าผิดพลาดสูงให้ตัวควบคุมมีค่าเกนมาก (เพื่อควบคุมให้เครื่องยนต์ตอบสนองไว) ซึ่งตัวควบคุมแบบฟัซซี่ที่ได้ออกแบบนี้นั้นจะมีคุณสมบัติดังกล่าวโดยสามารถพิจารณาได้จากความชันของกราฟพื้นผิวควบคุม (Control Surface) (Figure 5, Right)

ตัวควบคุมแบบฟัซซี่มีตัวเกนสเกลค่า (Scaling Gain) ในการแปลงสัญญาณเข้าทั้งสองตัว ให้อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ก่อนที่จะเข้ากระบวนการต่อไป เนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซี่นี้เป็นลักษณะเซตวิภัชนัยปกติ โดยมีค่าเอกภพของสรรพสาระอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ตัว การออกแบบค่าสัมประสิทธิ์นั้นต้องออกแบบให้เหมาะสมกับช่วงสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออก โดยออกแบบได้ดังนี้ $a_1 = 0.003$, $a_2 = 0.07$ และ $b = 1$ การกำหนดค่าระดับขั้นของความเป็นสมาชิก (Degree of Membership) ของใช้ฟังก์ชันภาวะสมาชิกแบบสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function) โดยฟังก์ชั่นภาวะสมาชิกของสัญญาณเข้า “Error” (Figure 5, Left) และ “Integrated Error” (Figure 5, Center) มีชื่อฟังก์ชั่นภาวะได้แก่ “-2”, “-1”, “0”, “1” และ “2” เรียงลำดับจากค่าต่ำไปสูง ส่วนฟังก์ชั่นภาวะสมาชิกของสัญญาณออกมีจำนวน 5 ค่า ซึ่งเป็นค่าคงที่ ได้แก่ -1, -0.1, 0, 0.1 และ 1 ตามลำดับ

ประพจน์วิภัชนัยประกอบข้อตั้งเป็นการเชื่อมโยงประพจน์ครบหน่วยด้วยอินเตอร์เซกชันวิภัชนัยพื้นฐานแบบค่าต่ำสุด (Minimum) และตัวแปลงกลับวิภัชนัย (Defuzzification) แบบค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) กฎการควบคุมของตัวควบคุมแบบฟัซซี่นั้นเป็นแบบสมมาตร และสร้างพื้นผิวควบคุมของคำสั่งหัวฉีดดีเซลได้ “Pulse Duration” (Figure 5, Right) โดยเมื่อได้ค่าคำสั่งออกมาแล้วจะนำไปรวมกับค่าการฉีดดีเซลปกติ (Nominal Main Duration) และสั่งคำสั่งไปยังระบบขับหัวฉีด หรือ Electronic Drive Unit (EDU) ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณคำสั่งไฟฟ้าแรงดันต่ำเป็นกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อควบคุมการยกของหัวฉีดดีเซล

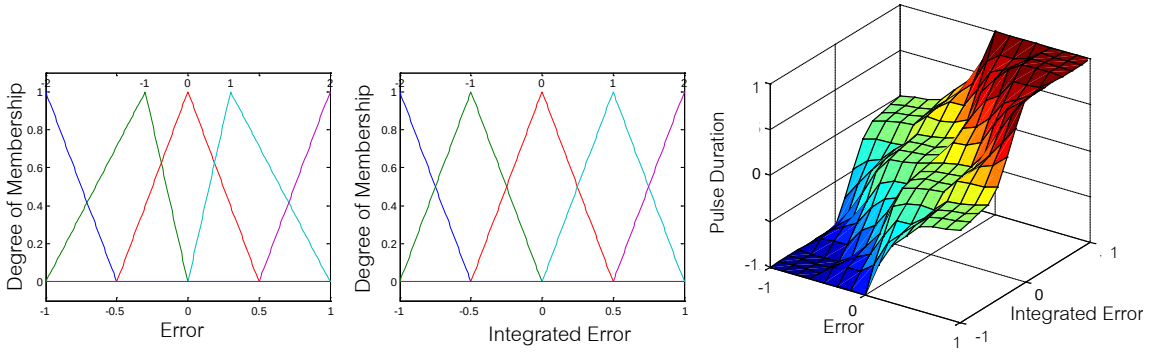


Figure 5 (Left) Membership Function of “Error” input, (Center) Membership Function of “Integrated Error” input, (Right) Control Surface of Fuzzy Controller

ผลและวิจารณ์การทดลอง

การควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์นี้จะควบคุมด้วยฉีดน้ำมันดีเซลเพียงครั้งเดียวต่อรอบการทำงาน เรียกว่า ฉีดน้ำมันดีเซลหลัก (Main Injection) โดยที่จังหวะการเริ่มต้นการฉีดน้ำมันดีเซล (Main SOI) นั้นจะถูกควบคุมไว้ที่ค่าคงที่ คือ ตำแหน่ง 6 องศาหลังจุดศูนย์ตายบน เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไม่รุนแรง ระบบควบคุมนั้นจะควบคุมระยะเวลาการยกของหัวฉีดดีเซลจากความกว้างสัญญาณ (Pulse Width) ซึ่งปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 1 มิลลิวินาที (Figure 6, Right) โดยประกอบด้วยค่าการฉีดดีเซลปกติ

(Nominal Main Duration) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 มิลลิวินาที และถูกรวมกับค่าที่มาจากตัวควบคุมแบบฟัซซี่เพื่อควบคุมรอบเดินเบา ในขณะที่จะควบคุมปริมาณการจ่ายก๊าซธรรมชาติที่แรงดันประมาณ 3 บาร์ ด้วยการกำหนดคำสั่งของแต่ละหัวฉีดไว้คงที่ที่ 5 มิลลิวินาที โดยกำหนดจังหวะการจ่ายก๊าซธรรมชาติสิ้นสุด (Gas EOI) ไว้ที่ 240 องศาก่อนจุดศูนย์ตายบนของแต่ละกระบอกสูบเสมอ (เครื่องยนต์นี้มีจังหวะปิดวาล์วไอดี IVC ที่ 149 องศาก่อนจุดศูนย์ตายบน) โดยจังหวะการจุดระเบิดจะเกิดขึ้นหลังจากฉีดน้ำมันดีเซลหลักเล็กน้อย

การใช้ก๊าซธรรมชาติในเครื่องยนต์นี้จะต้องการปริมาณอากาศต่ำกว่าการเผาไหม้แบบดีเซลปกติ โดยการฉีดก๊าซธรรมชาตินั้นจะเป็นการแทนที่อากาศทำให้ปริมาณอากาศลดลงส่วนหนึ่งแล้ว อุณหภูมิอากาศที่ต่ำลงเล็กน้อยมีผลให้อากาศมีความหนาแน่นขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามระบบทางเดินอากาศนั้นสามารถใช้ระบบควบคุมเดิมของเครื่องยนต์ได้ดี ซึ่งจะทำการหรี่อากาศบางส่วนโดยจะควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle) และควบคุมลิ้นไอเสียหมุนวน (EGR Valve) ที่ตำแหน่งคงที่ คือ 30 องศา และ 0 องศาตามลำดับ

การทดลองการควบคุมรอบเดินเบาเครื่องยนต์นั้นจะทำการทดลองกับรถพิกอัปโตโยต้า Hilux Vigo Champ โดยกำหนดค่าอ้างอิงของรอบเดินเบาที่ 750 รอบต่อนาที (Figure 6, Left) การทดลองเริ่มต้นจากตำแหน่งเกียร์ว่างที่เวลาประมาณ 0 วินาที โดยทำการเหยียบคลัทช์เพื่อเข้าเกียร์ 1 จากนั้นเมื่อเวลาประมาณ 2 วินาที ทำการปล่อยคลัทช์ โดยไม่เหยียบคันเร่ง เพื่อให้ระบบควบคุมรอบเดินเบาทำงาน โดยในช่วงเวลาประมาณ 2 วินาทีหลังจากนั้นรอบเครื่องยนต์จะตกลงไปต่ำสุด ประมาณ 640 รอบต่อนาที หลังจากนั้นอีกประมาณ 1.5 วินาทีระบบควบคุมแบบฟัซซี่นั้นจะสามารถควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์ไว้ที่ค่าอ้างอิงได้ โดยมีสัญญาณควบคุมคือ ความกว้างสัญญาณการฉีดน้ำมันดีเซลหลัก (Main Diesel Pulse) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.45 ถึง 0.7 มิลลิวินาที (Figure 6, Right)

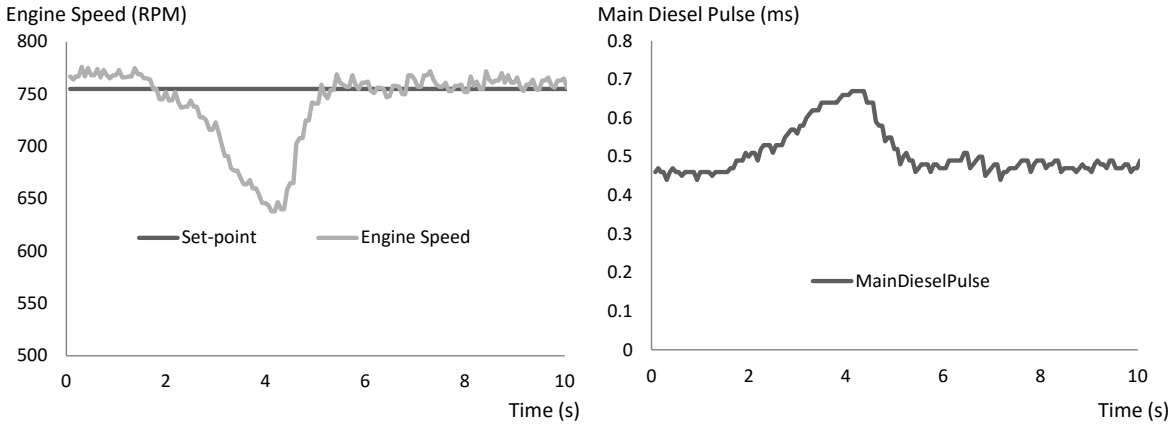


Figure 6 Experimental Results, (Left) Engine speed compare with its set-point, (Right) Output from the Fuzzy Controller, Main Diesel Pulse, to control DDF engine

สรุป

ปัญหาของเครื่องยนต์ดีเซลเชื้อเพลิงร่วมคือ เครื่องยนต์มีความซับซ้อนในการเผาไหม้สูงแต่ส่วนมากใช้ตัวควบคุมที่ไม่มีประสิทธิภาพ เช่น ไม่สามารถควบคุมการฉีดน้ำมันดีเซลได้ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนำชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์มาควบคุมเครื่องยนต์ดังกล่าว โดยพิจารณาที่สภาวะรอบเดินเบาซึ่ง

ถือว่าเป็นสภาวะที่ใช้งานบ่อยสำหรับการขับขี่ในเมือง โดยออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี่เพื่อควบคุมรอบเดินเบาเครื่องยนต์ด้วยการปรับความกว้างสัญญาณการฉีดน้ำมันดีเซลหลัก ซึ่งตัวควบคุมแบบฟัซซี่สามารถจำลองตรรกะของมนุษย์จากการออกแบบกฎการควบคุมเพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างเหมาะสม จากการทดลองกับรถพิกอัปโตโยต้า Hilux Vigo Champ ที่ใช้เครื่องยนต์ดังกล่าว โดยการทดลองเข้าเกียร์ให้รถเคลื่อนที่ไปด้านหน้าโดยไม่เหยียบคันเร่ง ระบบควบคุมรอบเดินเบาแบบฟัซซี่สามารถควบคุมรอบเครื่องยนต์จากที่ค่าต่ำสุดให้กลับมาคงที่ ที่ค่าอ้างอิงได้ในเวลา 1.5 วินาที

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2556. **สถิติพลังงานของประเทศไทย ๒๕๕๖**. 62 หน้า

Abd Alla, G.H., H.A. Soliman, O.A. Badr and M.F. Abd Rabbo. 2002. Effect of ignition timing on performance of dual fuel engine. **Energy Conversion and Management** 43: 269-277.

Chatlattanagulchai W., K. Yaovaja, S. Rhienprayoon, and K. Wannatong. 2010. Air-fuel ratio regulation with optimum throttle opening in diesel-dual-fuel engine. **SAE Paper**: 2010-01-1574

_____, S. Damyot, D. Kijdech and K. Yaovaja. 2015. Fuzzy learning control of rail pressure in diesel-dual-fuel premixed-charge-compression-ignition engine. **Kasetsart Journal - Natural Science** 49 (2): 251-262.

Di, X., Y. Huang, Y. Ge, G. Li and M. Hu. 2015., Fuzzy-PID Speed Control of Diesel Engine Based on Load Estimation. **SAE Int. J. Engines** 8(4):1669-1677.

Farouk, N. 2012. Genetic Algorithm and Fuzzy Tuning PID Controller Applied on Speed Control System for Marine Diesel Engines. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology** 4(21): 4350-4357

Kusaka, J. and T. Okamoto. 2000. Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual-fueled with natural gas. **Energy Conversion and Management** 43: 269-277.

Lee, C.S., K.H. Lee and D.S. Kim. 2003. Experimental and numerical study on the combustion characteristics of partially premixed charge compression ignition engine with dual fuel. **Fuel** 82 (2003): 553–560.

Lynch, C., H. Hagras and V. Callaghan. 2005. Embedded Type-2 FLC for the Speed Control of Marine and Traction Diesel Engines **IEEE International Conference on Fuzzy Systems** pp. 347-353.

Papagiannakis, R.G., D.T. Hountalas and C.D. Rakopoulos. 2007. Theoretical study of the effects of pilot fuel quantity and its injection timing on the performance and emissions of a dual fuel diesel engine. **Energy Conversion and Management** 48 (2007): 2951-2961

Yaovaja, K., Chatlatanagulchai, W. 2014. Knock control in a diesel-dual-fuel premixed-charge-compression-ignition (DF-PCCI) engine using a fuzzy supervisory system. **Kasetsart Journal - Natural Science** 48 (1): 120-138.

การสร้างน้ำค้างด้วยเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก

Dew Formation from Thermoelectric Cooler

ฐิติพงศ์ กุฎีพันธ์[1*] พิชญ์นรี ลลิตาภรณ์[1] และ มณฑล ฐานุตตมวงศ์[1]

Titipong Kudeepun[1*] Pichnaree Lalitaporn[1] and Monthon Thanuttamavong[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างน้ำค้างด้วยเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก โดยประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งถูกพัฒนามาจากการอาศัยความเย็นที่ได้ตามปรากฏการณ์เพลเทียร์ เพื่อให้เกิดความเย็นจนถึงจุดน้ำค้าง และเกิดการควบแน่นความชื้นในอากาศให้กลายเป็นหยดน้ำ มีการออกแบบชุดทดสอบเป็น 4 แบบได้แก่ 1) ชุดควบแน่นที่อยู่ในระบบปิด (ปิดฝา) 2) ชุดควบแน่นที่มีการสัมผัสกับอากาศปกติ (เปิดฝา) 3) ชุดควบแน่นที่มีการใช้พัดลมดูดอากาศจากภายในโมเดลออกมาสู่ภายนอก และ4) ชุดควบแน่นที่มีการใช้พัดลมเป่าลมเข้าภายในโมเดล ผลการศึกษาพบว่าชุดทดสอบที่เหมาะสมที่สุดคือ ชุดควบแน่นที่มีการใช้พัดลมเป่าอากาศในทิศทางเข้าภายในโมเดล โดยมีการถ่ายเทมวลอากาศเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสร้างน้ำค้างด้วยเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก หลังจากนั้นจึงทดสอบอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราเร็วลมที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.4 เมตรต่อวินาที ใช้กำลังไฟ 20.12 วัตต์ ณ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ 31.1°C และ 80% ตามลำดับ สามารถผลิตน้ำได้ 9.05 มิลลิลิตร ภายในเวลา 2 ชั่วโมง

ABSTRACT

This research was a study of affecting factors for the dew formation from thermoelectric cooler. There was an application of thermoelectric plates, which were developed by using of coolness from Peltier effect; to meet the dew point temperature and to condense moisture contents in the atmosphere into water droplets. Four models were designed, for example, 1) condensation series in the closed system, 2) condensation series contacted with the atmosphere directly (open system), 3) series by use a fan blow the air from inside system to outside system and 4) condensation series by use a fan blow the air in the system. The results were found that condensation series by using a fan blowing the air in the system was the most appropriate model. Air mass flow was the important factor on water production from the thermoelectric cooler. Finally, the wind velocities to blow the air in the system was found that the suitable wind velocity was 1.4 m/s with 20.12 watt of energy requirement to produce the water approximately 9.05 milliliters within 2 hours.

Key Words: Thermoelectric, Peltier effect, condensation, dew

* Corresponding author; e-mail address: titipongbr@hotmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

น้ำเป็นส่วนประกอบที่พบมากถึง 3 ใน 4 ส่วนของพื้นโลก และเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เนื่องจากร่างกายมีน้ำเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 2 ใน 3 ของน้ำหนักตัว มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ช่วยในการลำเลียงอาหาร การไหลเวียนของเลือด และขับของเสียออกจากร่างกายนอกจากนี้ร่างกายจะสูญเสียน้ำเฉลี่ยประมาณ 2.7-3.2 ลิตรต่อวัน (จิระพร, 2544) ร่างกายจึงต้องการน้ำมาทดแทนในส่วนที่ร่างกายเสียไปดังนั้นในพื้นที่ที่ห่างไกลแหล่งน้ำมนุษย์จะไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้หากขาดน้ำ

ในธรรมชาติสัตว์ต่างๆจะใช้น้ำค้างในการดำรงชีวิต จากการสังเกตปรากฏการณ์ของการเกิดน้ำค้างในธรรมชาตินั้นพบว่า น้ำค้างเกิดจากละอองไอน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในอากาศ โดยปกติน้ำจะระเหยและแทรกซึมอยู่ในอากาศ เมื่ออากาศมีความชื้นจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว อากาศจะไม่สามารถกักเก็บไอน้ำได้อีก แล้วเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวตกลงมาสู่พื้นและเปลี่ยนแปลงสถานะจากไอน้ำเป็นหยดน้ำนี้เป็นผลมาจากการขจัดหรือเพิ่มความร้อนที่หมุนเวียนอย่างมีระบบ นอกจากนี้การหมุนเวียนของไอน้ำยังแสดงให้เห็นว่า รอบตัวเรานั้นมีไอน้ำอยู่ โดยสามารถสังเกตได้จากการที่มีหยดน้ำเกาะอยู่บริเวณภายนอกของแก้วที่มีน้ำแข็งอยู่ เนื่องจากความเย็นจากน้ำแข็งทำให้อุณหภูมิผิวแก้วเย็นลง ในขณะที่อากาศโดยรอบมีความชื้นคงที่ อากาศที่มากระทบกับผิวแก้วจะกลั่นเป็นหยดน้ำเกาะอยู่ที่ผิวดังกล่าว และเมื่อหยดน้ำมีน้ำหนักมากพอก็จะไหลลงสู่พื้นโต๊ะหรือภาชนะรองรับจากการศึกษาวิธีการเก็บน้ำค้างที่ผ่านมาพบว่าวิธีการเก็บน้ำค้างเพื่อนำมาใช้ประโยชน์นั้นจะต้องมีการใช้พื้นที่เป็นจำนวนมากเนื่องจากน้ำค้างจำเป็นต้องใช้พื้นที่ผิวในการยึดเกาะ

จากข้อมูลข้างต้นจึงได้ศึกษาอุปกรณ์ที่ให้ความเย็น และสามรถนำมาพัฒนาในการสร้างเครื่องผลิตน้ำค้าง จึงพบว่าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถนำมาใช้เป็นต้นกำเนิดความเย็นได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นส่วนประกอบในตู้เย็นขนาดเล็กเช่น ตู้เย็น USB ตู้เย็นแช่วัคซีน เป็นต้น โดยเทอร์โมอิเล็กทริกมีความสามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นความเย็นได้ โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เพลเทียร์นั่นคือ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรจะทำให้ด้านหนึ่งอุณหภูมิสูงขึ้นและอีกด้านหนึ่งมีอุณหภูมิลดลง และถ้ากลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า(นวภัทรา, 2555) จากข้อมูลนี้ผู้วิจัยจึงนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดความเย็นของเครื่องผลิตน้ำดื่มขนาดพกพา โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างน้ำค้างด้วยเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบอุปกรณ์สร้างน้ำค้างสำหรับผลิตน้ำโดยนำแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมาพัฒนาเป็นชุดการควบแน่นของน้ำในอากาศ ดำเนินการเริ่มแรกโดยให้กระแสไฟฟ้า ที่ทำให้ชุดการควบแน่นมีอุณหภูมิที่เหมาะสม (Ts) ที่ทำให้เกิดน้ำ สามารถหาอุณหภูมินั่นได้จากจากสมการ

$$T_{dp} = \sqrt[8]{\frac{Hr_i}{100}} \cdot (112+0.9 \cdot T_i)+0.1 \cdot T_i-112 \quad (1)$$

สมการที่1เป็นสมการอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

$$T_s = T_{dp} - 4 \quad (2)$$

สมการที่ 2 เป็นอุณหภูมิที่สามารถทำให้เกิดหยดน้ำ (M.A. Muoñz-Garcíaet al., 2013) ดังนั้นหากต้องการให้ชุดทดสอบสามารถผลิตน้ำได้จะต้องมีอุณหภูมิที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ อุณหภูมิที่หาได้จากสมการที่ 2

การทดลองรูปแบบชุดทดสอบ

ชุดทดสอบสร้างน้ำค้างด้วยเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก มีน้ำหนัก 388 กรัม ออกแบบลักษณะตาม Figure 1 โดยแบ่งชุดทดสอบเป็น 4 แบบ ดังนี้

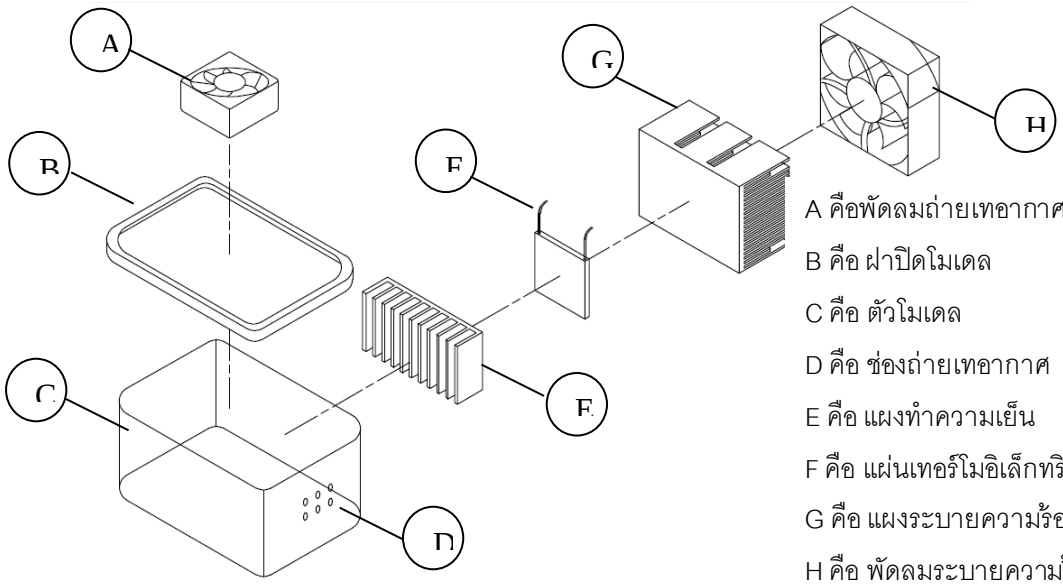


Figure1 Model of Dew Storage

ชุดทดสอบแบบที่ 1 ชุดควบแน่นที่อยู่ในระบบปิด(ปิดฝา B) และปิดการทำงานพัดลม (A)ใช้พลังงานไฟ 17.18 วัตต์

ชุดทดสอบแบบที่ 2 ชุดควบแน่นที่มีการสัมผัสกับอากาศปกติ (เปิดฝา B) และปิดการทำงานพัดลม (A)ใช้พลังงานไฟ 17.18 วัตต์

ชุดทดสอบแบบที่ 3 ชุดควบแน่นที่มีการใช้พัดลมดูดอากาศจากภายในโมเดลออกมาสู่ภายนอก (ปิดฝา B) และเปิดพัดลม (A) ในทิศดูดอากาศออก ใช้พลังงานไฟ 20.12 วัตต์

ชุดทดสอบแบบที่ 4 ชุดควบแน่นที่มีการใช้พัดลมเป่าลมเข้าภายในโมเดล (ปิดฝา B) และเปิดการทำงานพัดลม (A) ในทิศเป่าอากาศเข้าภายในโมเดล ใช้พลังงานไฟ 20.12 วัตต์

โดยทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นภายในและภายนอกโมเดล อุณหภูมิบนแผงทำความเย็นรวมถึงปริมาณน้ำที่เกิดขึ้น ทุกๆ 5 นาที ตลอดระยะเวลา 2 ชั่วโมง ของชุดทดสอบทั้ง 4 แบบ จากนั้นวิเคราะห์และสรุปผลหาแบบที่เหมาะสมที่สุด

การทดสอบอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศ

หลังจากทำการทดลองรูปแบบชุดทดสอบแล้ว หากพบว่าการถ่ายเทมวลอากาศเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดน้ำค้างแล้ว จึงพิจารณาชุดทดสอบที่ 3 หรือ 4 โดยเลือกชุดทดสอบที่มีปริมาณน้ำสะสมมากที่สุดภายในเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีพัดลมในการถ่ายเทมวลอากาศ ซึ่งพัดลมถ่ายเทมวลอากาศทำมุม 30°กับแผงทำความเย็น และมีอัตราเร็วลม ณ ตำแหน่งหน้าพัดลมถ่ายเทอากาศที่มีค่าแตกต่างกัน ดังนี้ 0.3, 1.4, 1.8, 2.1, 2.6 และ 3.1 เมตรต่อวินาทีและทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นภายในและภายนอกโมเดล อุณหภูมิบนแผงทำความเย็นรวมถึงปริมาณน้ำที่เกิดขึ้น ทุกๆ 5 นาที ตลอดระยะเวลา 2 ชั่วโมง วิเคราะห์และสรุปผลหาแบบที่เหมาะสมที่สุด

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองรูปแบบชุดทดสอบ

Figure 2 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นของชุดทดสอบทั้ง 4 แบบ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิ T_i และความชื้นสัมพัทธ์ Hr_i ภายในชุดทดสอบ ของทุกแบบชุดทดสอบต่ำกว่าอุณหภูมิ T_oและความชื้นสัมพัทธ์ Hr_o ของมวลอากาศภายนอกชุดทดสอบ เนื่องจากเป็นบรรยากาศที่อยู่ภายในใกล้แผงทำความเย็นซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดหยดน้ำ ชุดทดสอบที่มีอุณหภูมิ T_iและความชื้นสัมพัทธ์ Hr_i ภายในและภายนอกแตกต่างกันมากที่สุดคือ ชุดทดสอบแบบที่ 1 เนื่องจากชุดทดสอบเป็นระบบปิด(ปิดฝา)การถ่ายเทมวลอากาศระหว่างภายในและภายนอกชุดทดสอบจึงไม่สะดวกเมื่อเทียบกับชุดทดสอบแบบอื่น

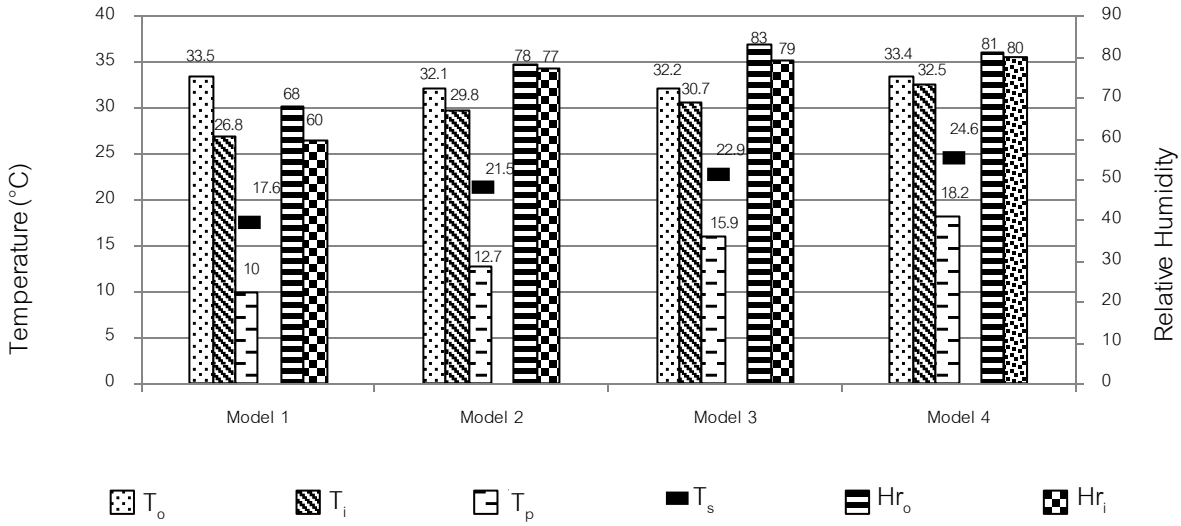


Figure 2 Comparison between temperature and Humidity for or four models

นอกจากนี้ Figure 2 แสดงค่า T_s (ตามสมการที่ 2) ของชุดทดสอบแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 17.6, 21.5, 22.9 และ 24.6 ตามลำดับ และค่า T_p ของชุดทดสอบแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 คือ 10, 12.7, 15.9 และ 18.2 ตามลำดับ ข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า T_s ของชุดทดสอบแบบที่ 1 มีค่าน้อยกว่าชุดทดสอบแบบอื่นๆ เนื่องจากการถ่ายเทมวลอากาศไม่ดีเท่ากับชุดทดสอบแบบอื่นๆ อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตค่า T_p พบว่าทุกชุดทดสอบมีค่าต่ำกว่าค่า T_sทุกชุดทดสอบจึงทำให้ชุดทดลอบทุกชุดสามารถเกิดหยดน้ำได้

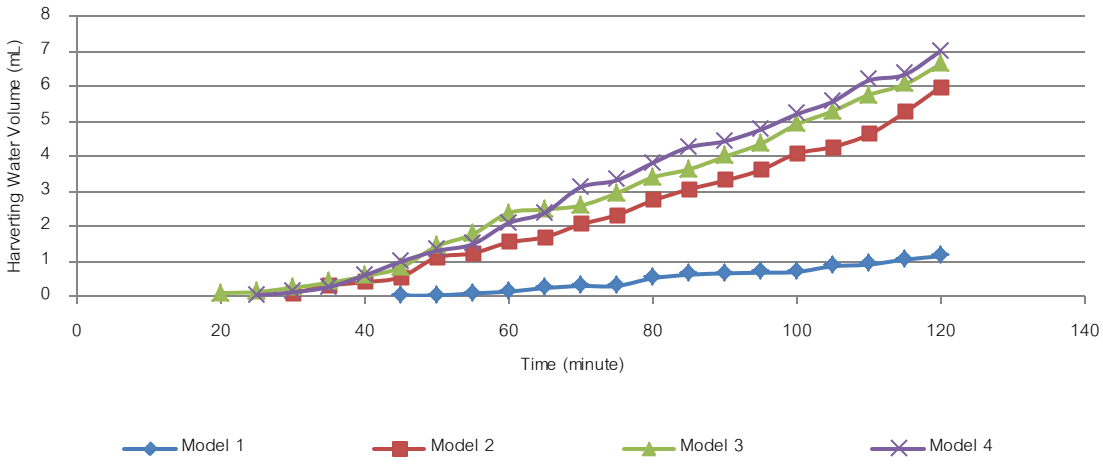


Figure 3 Production rate of water for 4 setup models

Figure 3 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสะสมกับเวลาของชุดทดสอบทั้ง 4 แบบ ในช่วงเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าที่เวลา 2 ชั่วโมง ชุดการทดสอบแบบที่ 1,2,3 และ 4 มีปริมาณน้ำสะสม 1.16, 5.98, 6.63 และ 7 มิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งจาก Figure 2 ค่าความแตกต่างระหว่าง T_sและ T_p ของชุดทดสอบแบบที่ 1,2,3 และ 4 มีค่า 7.6, 8.8, 7 และ 6.4 ตามลำดับ จึงไม่มีผลต่อการเกิดปริมาณน้ำของแต่ละชุดทดสอบ

จาก Figure 3 พบว่าปริมาณน้ำสะสมของชุดทดสอบแบบที่ 1 มีปริมาณน้ำสะสมน้อยที่สุด เนื่องจากชุดทดสอบแบบที่ 1 เป็นระบบปิดจึงไม่มีการถ่ายเทมวลอากาศ ซึ่งต่างจากชุดทดสอบแบบอื่นๆ ที่สามารถถ่ายเทมวลอากาศได้มากกว่า ชุดทดสอบแบบที่ 3 และ 4 มีการถ่ายเทมวลอากาศด้วยวิธีนำพา ซึ่งมีปริมาณน้ำสะสมที่ดีกว่าชุดทดสอบแบบที่ 2 ที่มีการถ่ายเทมวลอากาศด้วยวิธีการแพร่ จึงทำให้ชุดทดสอบแบบที่ 3 และ 4 มีปริมาณน้ำสะสมใกล้เคียงกัน แต่ชุดทดสอบแบบที่ 4 เกิดปริมาณน้ำสะสมได้ดีกว่าชุดทดสอบแบบที่ 3 เนื่องจากชุดทดสอบแบบที่ 4 มีทิศทางพัดลมในการเป่าอากาศเข้าไปที่แผงทำความเย็นจึงเป็นตัวไล่หยดน้ำที่ติดค้างอยู่บนแผงความเย็น ทำให้เกิดหยดน้ำได้ดีกว่า

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดน้ำค้างนอกจากอุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์แล้วยังมีการถ่ายเทมวลอากาศที่เป็นปัจจัยหลักในการเกิดน้ำค้าง ดังนั้นจึงนำชุดทดสอบแบบที่ 4 มาพัฒนาในขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นชุดทดสอบที่ถ่ายเทมวลอากาศได้ดีที่สุด และยังมีปริมาณน้ำสะสมมากที่สุดอีกด้วย

การทดสอบอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศ

จาก Figure 4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นของอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งมีการพัฒนาจากชุดทดสอบแบบที่ 4 ที่มีทิศเป่าลมเข้าภายในโมเดลผลกาศึกษาพบว่าอุณหภูมิ T_i และความชื้นสัมพัทธ์ Hr_i ภายในชุดทดสอบ ของทุกอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศ มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิ T_o และความชื้นสัมพัทธ์ Hr_o ของมวลอากาศภายนอกชุดทดสอบ เนื่องจากเป็นบรรยากาศที่อยู่ภายในใกล้แผงทำความเย็นซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดหยดน้ำและเมื่อสังเกตจะพบว่าอุณหภูมิ T_iและความชื้นสัมพัทธ์ Hr_i ภายในและภายนอก มีความแตกต่างใกล้เคียงกันในทุกอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศ เนื่องจากการถ่ายเทมวลอากาศระหว่างภายในและภายนอกชุดทดสอบดีใกล้เคียงกัน

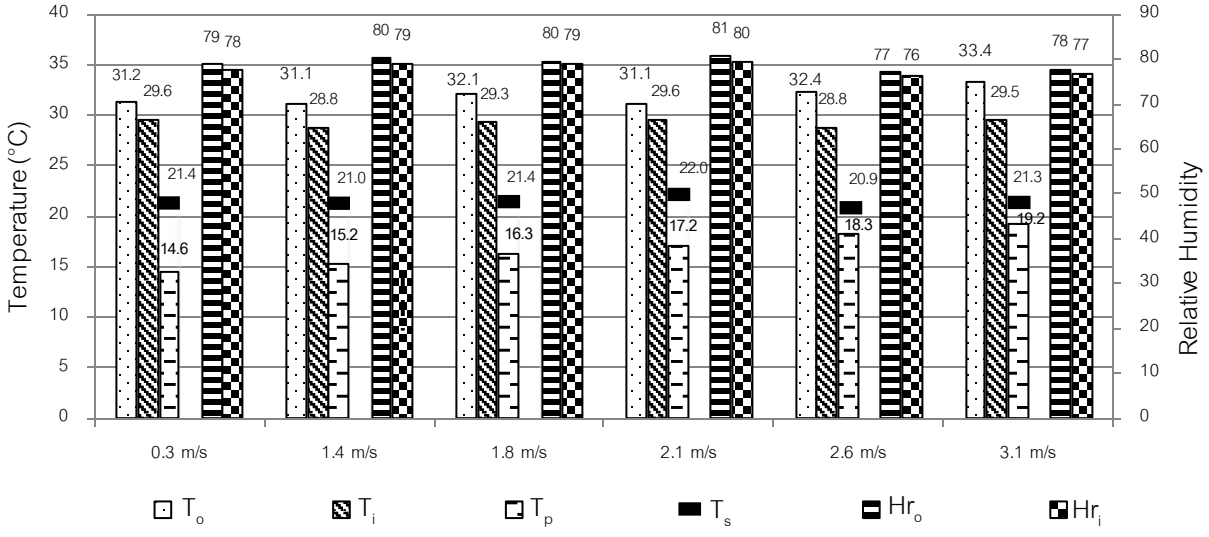


Figure 4 Comparison between temperature and humidity with different air flow rates

นอกจากนี้ Figure 4 แสดงให้เห็นว่าค่า T_pในทุกๆอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศมีค่าต่ำกว่าค่า T_s เมื่อสังเกตค่าความแตกต่างระหว่าง T_p กับ T_s พบว่า อัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศ 0.3 ,1.4, 1.8, 2.1,

2.4, และ 3.1 เมตรต่อวินาที มีค่าความแตกต่างเท่ากับ 6.8, 5.8, 5.1, 4.8, 2.6 และ 2.1ตามลำดับ จะพบว่าที่อัตราเร็วสูงค่าความแตกต่างของ T_p กับ T_s จะน้อยกว่าที่ความเร็วลมต่ำ เนื่องจากที่อัตราเร็วลมสูงจะมีการถ่ายเทมวลอากาศจากภายนอกมาสัมผัสกับแผงความเย็นได้มากกว่าความเร็วลมต่ำ

จาก Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสะสมของน้ำกับเวลาของชุดทดสอบอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่แตกต่างกันพบว่า ชุดทดสอบอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่ 1.4, 1.8 และ 2.1 เมตรต่อวินาที ในเวลา 2 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำสะสมใกล้เคียงกัน แต่มีปริมาณน้ำสะสมมากกว่าชุดทดสอบอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่ 0.3, 2.6 และ 3.1 เมตรต่อวินาที เนื่องจากที่อัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่ 0.3 เมตรต่อวินาที อัตราเร็วลมมีความสามารถในการไล่หยดน้ำที่เกาะอยู่บนแผงทำความเย็นได้น้อย ทำให้แผงทำความเย็นกลั่นน้ำจากอากาศมาแทนที่ได้น้อยกว่าชุดทดสอบอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่ 1.4, 1.8 และ 2.1 เมตรต่อวินาที ในขณะเดียวกันอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่ 2.6 และ 3.1 เมตรต่อวินาที มีปริมาณน้ำน้อยกว่าชุดทดสอบอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่ 1.4, 1.8 และ 2.1 เมตรต่อวินาที เนื่องจากอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศมีอัตราเร็วลมสูง ทำให้หยดน้ำที่เกาะอยู่บนแผงทำความเย็นระเหยออกไปกับมวลอากาศที่ถูกถ่ายเทออกไป

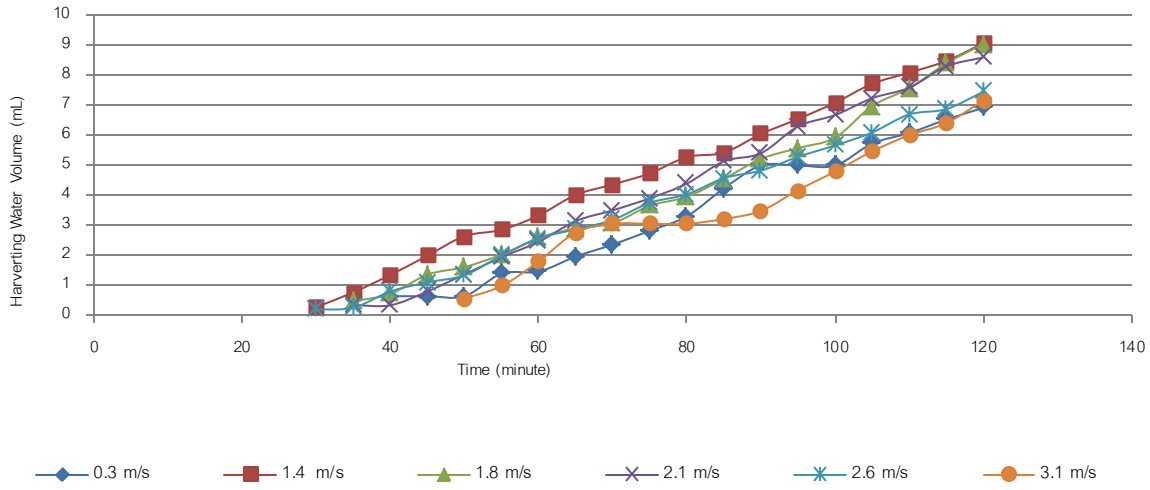


Figure 5 Production rate of water with different air flow rates

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าการถ่ายเทมวลอากาศมีผลต่อการเกิดน้ำค้าง และอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองคือ 1.4 เมตรต่อวินาที ภายในเวลา 2 ชั่วโมง

สรุป

ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างน้ำค้างด้วยเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก นอกจากอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์แล้ว ยังมีการถ่ายเทมวลอากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกด้วย ดังนั้นชุดทดสอบแบบที่ 4 ที่มีพัดลมถ่ายเทอากาศในทิศทางเป่าเข้าภายในโมเดล จึงเหมาะสมที่สุด ซึ่งเครื่องสร้างน้ำค้างด้วยเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก มีน้ำหนัก 388 กรัม มีอัตราเร็วลมของพัดลมถ่ายเทอากาศที่เหมาะสมคือ 1.4 เมตรต่อวินาที ใช้กำลังไฟ 20.12 วัตต์ เมื่อเปิดในระยะเวลา 2 ชั่วโมง สามารถผลิตน้ำได้ 9.05 มิลลิลิตร

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณปรัชญา จันทร์ศักดิ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

T_{dp} = อุณหภูมิจุดน้ำค้าง

T_o = อุณหภูมิห้อง ณ เวลาทดลอง

T_i = คืออุณหภูมิภายในโมเดล

T_p = อุณหภูมิบนแผงนำความเย็น

T_s = อุณหภูมิที่สามารถทำให้เกิดหยดน้ำ

Hr_o = ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกชุดทดสอบ

Hr_i = ความชื้นสัมพัทธ์ภายในชุดทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

จีระพร จิตบำรุง. 2544.**ความสำคัญของน้ำ**, แหล่งที่มา :http://www.nectec.or.th/schoolnet /library/create-web/10000/science/10000-82.html, 1 กันยายน 2556.

ชัชจริยา ใบลี. 2541. **การศึกษาสารประกอบทางอุตุนิยมวิทยาที่มีผลต่อการเกิดน้ำค้างในจังหวัดเลย**. สถาบันราชภัฏเลย.

ทศวรรษ สีตะวัน. 2558. **เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,กรุงเทพฯ.

นวภัทรา หนูนาค และทวีพล ซื่อสัตย์.2555. **การวัดและเครื่องมือวัดการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

นิรนาม. 2011. **น้ำค้างเกิดได้อย่างไร**. แหล่งที่มา: http://www.myfirstbrain.com/student_view.aspx?ID=76040 ,1 กันยายน 2556.

Finch, Vernor C. , Glenn T. Trewartha and M.H Shearer. 1948. **The Earth and Its Resources**. 2 nd.ed.McGraw – Hill Book Compary, Inc.

J.F.Maestre-Valero, V. Martínez-Alvarez, A. Baille, B. Martín-Górriz and B. Gallego-Elvira. 2011. Comparative analysis of two polyethylene foil materials for dew harvesting in a semi-arid climate. **Journal of Hydrology** 410: 84-91.

M.A. Muñoz-Grcía, G.P. Moreda, M.P. Raga-Arroyo and O. Marín-González. 2013. Water harvesting for young trees using Peltier modules powered by photovoltaic solar energy. **Computersand Electronics in Agriculture** 93: 60-67.

S.Chaterjee and K..Pandey. 2003. Thermoelectric cold-chain chests for storing/transporting vaccines in remote regions. **Applied Energy** 76: 415-433.

การควบคุมปริมาณการจ่ายสารส้มในกระบวนการผลิตน้ำประปาด้วยเครื่องเอสซีเอ็ม

Control of Alum Dose in Water Treatment Process with Streaming Current Monitor (SCM)

กุลภา คงมีเงิน[1*] มณฑล ฐานุตตมวงศ์[1] และสมศักดิ์ ปัสนานนท์[2]

Kullapa Kongmingoen[1*], Monthon Thanuttamavong[1] and Somsak Passananon[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเอสซีเอ็ม (Streaming Current Monitor : SCM) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ควบคุมการจ่ายสารสร้างตะกอนแบบต่อเนื่อง โดยใช้หลักการตรวจวัดกระแสหรือศักย์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของอนุภาคในสารละลายและทำให้เกิดการแยกตัวออกของประจุที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค ในขั้นตอนแรกเป็นการทดลองการทำงานและปัจจัยที่มีผลต่อการอ่านค่าเอสซีเอ็ม พบว่าน้ำดิบที่มีความขุ่นตามธรรมชาติและสารละลายสารส้มเมื่อทำปฏิกิริยากับสภาพความเป็นด่างในน้ำ ถูกอ่านค่าด้วยเครื่องเอสซีเอ็มได้เป็นลบและบวกตามลำดับ เมื่อนำเครื่องเอสซีเอ็มมาติดตั้งเพื่อทดสอบการใช้งานจริงที่ถังตกตะกอนแบบสัมผัสของแข็ง ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง พบว่าสามารถใช้ควบคุมและปรับปริมาณการจ่ายสารส้มแบบอัตโนมัติได้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง โดยมีคุณภาพน้ำหลังการตกตะกอนอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการก่อนส่งเข้าสู่บ่อกรอง และสามารถลดปริมาณการใช้สารส้มได้เฉลี่ยประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ABSTRACT

The objective of this research was to examine the operational efficiency of Streaming Current Monitor (SCM). The SCM is a fundamental tool for monitoring and controlling of optimum coagulant dose that results from changing the electrical potential of colloid surfaces during transport along with the pressure-driven flow. As the results, the SCM showed negative and positive values for raw water and alum solution mixed with alkaline water, respectively. Furthermore, the application of SCM in a solid-contact clarifier at Bangkhen Water Treatment Plant, Metropolitan Waterworks Authority, Bangkok was elaborated to show capability of continuously optimum alum dose controlling, good quality of effluent and significant decrease of chemical usage, approximately 10 mg/l.

Key words: Jar Test, Optimum Dose, Solid-contact Clarifier, Streaming Current Monitor (SCM)

* Corresponding author; e-mail address: paikullapa@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]กองผลิตและจ่ายน้ำ โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง กรุงเทพฯ 10210

[2]Water Production and Distribution Division, Bangkhen Water Treatment Plant Department, Metropolitan Waterworks Authority, Bangkok 10210

คำนำ

กระบวนการการผลิตน้ำประปาในปัจจุบันของประเทศไทย มีขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบหลายขั้นตอน ซึ่งหนึ่งในขั้นตอนสำคัญก่อนนำน้ำเข้าสู่การกรองก็คือการลดความขุ่น โดยการตกตะกอนทางเคมี ด้วยการใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำดิบตามธรรมชาติ จึงมีวิธีการหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมด้วยวิธีการทำจาร์เทส งานวิจัยนี้ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องเอสซีเอ็ม (Streaming Current Monitor : SCM) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในการหาและควบคุมปริมาณการจ่ายสารส้มที่เหมาะสม

เครื่องเอสซีเอ็มเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ควบคุมการจ่ายสารสร้างตะกอนแบบต่อเนื่อง(Dentel S. K. and Kingery K. M., 1989) โดยใช้หลักการตรวจวัดกระแสหรือศักย์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของอนุภาคในสารละลายและทำให้เกิดการแยกตัวออกของประจุที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค (Daniel Edney, 2005) ในการใช้เครื่องเอสซีเอ็มเพื่อตรวจวัดความสมดุลของศักย์ไฟฟ้าดังกล่าว สามารถนำมาควบคุมการจ่ายสารส้มในปริมาณที่เหมาะสมในระหว่างขั้นตอนการกวนเร็วเพื่อผสมสารเคมีกับน้ำดิบ (Dentel S. K. et al., 1989)

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเอสซีเอ็มในการนำมาใช้ในระบบตกตะกอนทางเคมีด้วยถังสัมผัสของแข็งของโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง จึงทำการศึกษาปริมาณการใช้สารส้มและคุณภาพน้ำที่ได้จากถังตกตะกอนแบบสัมผัสของแข็งที่ควบคุมปริมาณการใช้สารส้มด้วยวิธีทำจาร์เทสเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้เครื่องเอสซีเอ็ม

อุปกรณ์และวิธีการ

การทำงานของเครื่องเอสซีเอ็ม เริ่มต้นจากการนำน้ำตัวอย่าง เช่น น้ำสะอาด, น้ำดิบที่ผสมสารส้มแล้วส่งผ่านเข้าเครื่องเพื่อทำการอ่านค่าสมดุลไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคในน้ำ (Streaming Current : SC) แล้วทำการปรับแก้ค่าเอสซีเริ่มต้นนั้นใหม่ให้เป็นเลขศูนย์ หลังจากนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารส้มหรือคุณภาพน้ำดิบ เครื่องเอสซีเอ็มจะอ่านค่าเป็นเลขบวกหรือเลขลบตามสมดุลของศักดิ์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้เครื่องเอสซีเอ็มที่ติดตั้งในถังตกตะกอนแบบสัมผัสของแข็ง ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขน ยังสามารถส่งข้อมูลไปที่อุปกรณ์จ่ายสารส้มในขั้นตอนการกวนเร็ว เพื่อปรับปริมาณการจ่ายสารให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยอัตโนมัติ จนกระทั่งค่าเอสซีกลับมาเป็นศูนย์ตามค่าอ้างอิงเริ่มต้น

การทำจาร์เทสเป็นการจำลองขั้นตอนที่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนแบบสัมผัสของแข็งของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนกวนเร็ว (ผสมสารส้มกับน้ำดิบ) กวนช้า (รวมกลุ่มตะกอน) และตกตะกอน เพื่อใช้ในหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสม โดยการวัดความขุ่นคงเหลือในน้ำหลังการตกตะกอน

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบผลของการอ่านค่าของเครื่องเอสซีเอ็มต่อคุณภาพน้ำดิบและปริมาณการเติมสารส้มที่ต่างกัน และส่วนที่สองเป็นการประยุกต์ใช้เครื่องเอสซีเอ็มเพื่อควมคุมการจ่ายสารส้มอย่างต่อเนื่องในกระบวนการตกตะกอนด้วยถังแบบสัมผัสของแข็ง ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง

การทดลองในส่วนแรกเริ่มจากการเตรียมน้ำตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบแบ่งเป็น 6 ลักษณะ ได้แก่ น้ำสะอาด (Blank) จากระบบกรองแบบรีเวอร์ออสโมซิส, น้ำที่มีสภาพความเป็นด่าง (Alkaline Water) โดยเตรียม

จากการละลายปูนขาวลงในน้ำสะอาดแล้ววัดค่าความเป็นด่างโดยวิธีไตรเตรชั่น, น้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบตกตะกอนทางเคมีของโรงงานผลิตน้ำบางเขน (Raw water IV) และนำมาเจือจางด้วยน้ำสะอาดเพื่อลดความเข้มข้นของพารามิเตอร์ในน้ำอีกจำนวน 3 ตัวอย่าง (Raw water III, Raw water II และRaw water I) โดยมีคุณภาพน้ำตัวอย่างทั้งหกแสดงในตารางที่ 1 (Table 1) จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมาผสมสารส้มปริมาณที่แตกต่างกันตามขั้นตอนการทำจาร์เทสโดยใช้เครื่องเอสซีเอ็มอ่านค่าเอสซีในระหว่างการกวนเร็ว แล้วจึงวิเคราะห์ค่าความขุ่นคงเหลือหลังการตกตะกอน

Table 1 Influent for SCM Testing

Influent	pH	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/l as $CaCO_3$)	TDS (mg/l)	Conductivity (µS/cm)
Blank	7.84	0	0	4.4	8.6
Alkaline water	11.03	2.54	118	254	510
Raw water I	6.61	7.46	24	56.5	114.7
Raw water II	7.28	14.2	44.8	101.4	205
Raw water III	6.74	21.3	64.6	135.5	269
Raw water IV	7.1	29.9	84.6	178.5	355

การทดลองส่วนที่สองเป็นการนำเครื่องเอสซีเอ็มไปติดตั้งที่ถังตกตะกอนแบบสัมผัสของแข็ง ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมปริมาณการใช้สารส้มและคุณภาพน้ำหลังจากตกตะกอนของถังตกตะกอนที่ควบคุมการจ่ายสารส้มด้วยวิธีทำจาร์เทส กับถังตกตะกอนที่ใช้เครื่องเอสซีเอ็ม ตัวอย่างน้ำที่ได้จากถังตกตะกอนแบบสัมผัสของแข็งทั้งสองถังถูกนำมาวิเคราะห์คุณภาพตามวิธีมาตรฐานของAmerican Public Health Association [APHA] et al. (1998) ตลอดระยะเวลาทำการทดลองตั้งแต่เดือนตุลาคม ถึงเดือน ธันวาคม 2557 โดยมีค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ในน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบตามตารางที่ 2 (Table 2)

Table 2 Quality of Raw water from Klongprapa

Parameters	pH	Temp (˚C)	Turbidity (NTU)	Conductivity (µS/cm)	Total Hardness (mg/l)	Alkalinity (mg/l as$CaCo_3$)	Color	TDS (mg/l)	Aluminum (mg/l)
mean	7.6	29	29.7	266	86	96	45	174	0.052
S.D.	0.2	1.3	4.8	24.1	3.6	4.8	9.9	29.1	0.02

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดจากการเปรียบเทียบผลของการอ่านค่าของเครื่องเอสซีเอ็มต่อคุณภาพน้ำดิบและปริมาณการเติมสารส้มที่ต่างกัน มีดังนี้

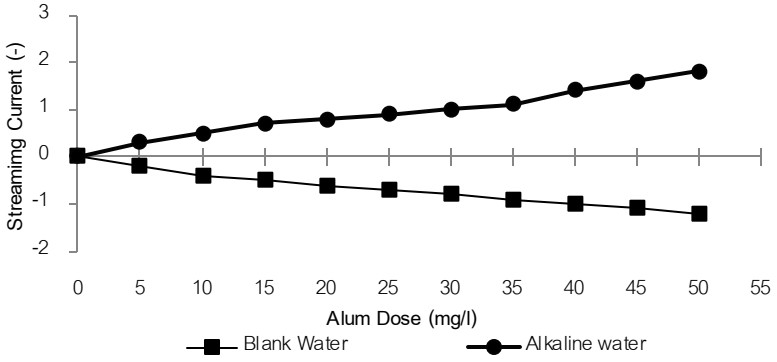


Figure 1 Effect of Alum Doses on SCM

จาก Figure 1 จะเห็นว่าค่าเอสซีก่อนเติมสารส้มของน้ำสะอาดเป็นค่าศูนย์ เนื่องจากตั้งค่าเริ่มต้นด้วยน้ำสะอาด ค่าเอสซีก่อนเติมสารส้มของน้ำที่มีสภาพความเป็นด่างเป็นค่าศูนย์แสดงให้เห็นว่าปูนขาวที่ใช้เตรียมน้ำตัวอย่างไม่มีผลต่อการอ่านค่าของเครื่อง เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำสะอาด ค่าที่เครื่องแสดงเป็นค่าลบซึ่งลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณของสารส้มที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับเมื่อเติมสารส้มลงในน้ำที่มีความเป็นด่างเครื่องแสดงค่าเป็นบวกและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณสารส้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งงานวิจัยของ Dentel S. K. et al. (1989) ที่ทำการเติมสารส้มลงในน้ำที่มี $NaHCO_3$ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลที่ได้คือค่าเอสซี เป็นไปในทางบวกมากขึ้นที่ปริมาณความเข้มข้นของสารส้มที่มากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารส้มเมื่อเจอสภาพความเป็นด่างทำให้การอ่านค่าเอสซีเป็นบวก

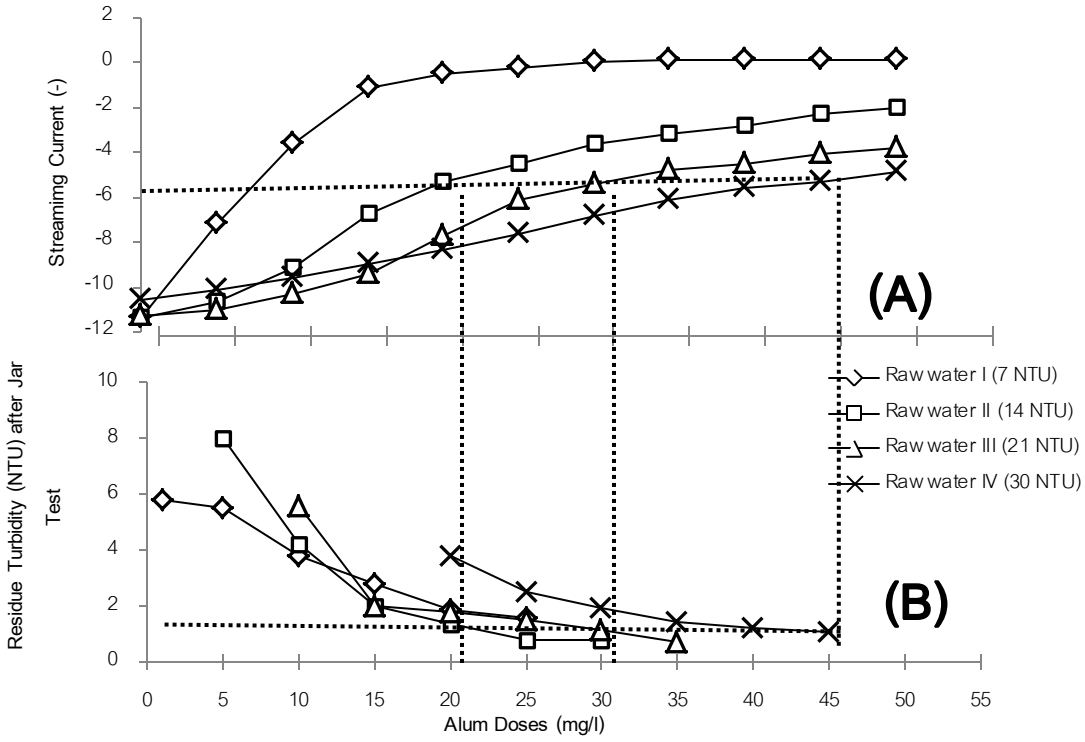


Figure 2 Values of SCM after coagulation (A), Residues Turbidity after Jar Test (B)

ผลการทดลองใน Figure 2 (A) เครื่องเอสซีเอ็มถูกตั้งค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ด้วยน้ำสะอาด เมื่อนำน้ำดิบตัวอย่างที่มีค่าความขุ่นตั้งแต่ 7 ถึง 30 เอ็นทียู มาอ่านค่าพบว่ามีค่าเอสซีใกล้เคียงกันเท่ากับ -11 ±1 หลังจากเริ่ม

เติมสารส้มเข้าไปผสม การเปลี่ยนแปลงของค่าเอสซีต่อปริมาณสารส้มที่ใช้ เกิดขึ้นกับน้ำดิบตัวอย่างที่มีความขุ่นต่ำมากกว่าน้ำดิบตัวอย่างที่มีความขุ่นสูง ในขณะที่ผลการทดลองตาม Figure 2 (B) แสดงการหาปริมาณสารส้มที่ใช้และความขุ่นคงเหลือในน้ำตัวอย่างที่เหมาะสม ด้วยวิธีการทำจาร์เทส พบว่าน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำต้องการปริมาณสารส้มน้อยกว่าน้ำดิบที่มีความขุ่นสูง

เมื่อพิจารณาผลของค่าเอสซีที่เพิ่มขึ้นของการเติมสารส้มในน้ำที่มีสภาพความเป็นด่าง (Figure 1) พบว่าเมื่อเติมสารส้มในน้ำดิบตัวอย่างที่มีสภาพความเป็นด่างแตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงของค่าเอสซีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในน้ำดิบที่มีสภาพความเป็นด่างสูงกว่า ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่าเอสซีในน้ำดิบที่มีสภาพความเป็นด่างต่ำกว่าเกิดขึ้นเฉพาะช่วงการเติมสารส้มในปริมาณน้อย จากความสัมพันธ์ของ Figure 2(A) และ Figure 2(B) น้ำดิบตัวอย่างที่ 4 (Raw Water IV) มีความขุ่น 30 เอ็นทียู ต้องการปริมาณสารส้มที่เหมาะสม 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าเอสซีเท่ากับ -6 หากเปรียบเทียบปริมาณสารส้มที่เหมาะสมของน้ำดิบตัวอย่างที่ 3 (Raw Water III) ที่มีความขุ่น 21 เอ็นทียู และน้ำดิบตัวอย่างที่ 2 (Raw Water II) ที่มีความขุ่น 14 เอ็นทียู คือ 30 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าเอสซีก็เท่ากับ -6 เช่นเดียวกัน ดังนั้นหากมีการปรับตั้งค่าเริ่มต้นใหม่เป็นศูนย์ ณ สภาวะที่มีการใช้ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับความขุ่นของน้ำดิบ (กรณีจาก Figure 2 (A) เป็น -6) เมื่อมีการเติมสารส้มมากหรือน้อยเกินปริมาณที่เหมาะสมเครื่องจะอ่านค่าเอสซีเป็นบวกและลบ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่าอ้างอิงเริ่มต้น (ศูนย์)

จากผลการทดลองในส่วนแรกจึงนำเครื่องเอสซีเอ็มไปประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมปริมาณการใช้สารส้มในถังตกตะกอนแบบสัมผัสของแข็ง ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง โดยต่อเข้ากับเครื่องควบคุมการจ่ายสารส้มแบบอัตโนมัติในขั้นตอนการกวนเร็ว ซึ่งเมื่อค่าเอสซีอ่านค่าได้เป็นบวกหรือลบ ก็จะมีการสั่งจ่ายสารส้มในปริมาณที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามลำดับ และทำการเก็บข้อมูลเปรียบเทียบกับถังตกตะกอนแบบสัมผัสของแข็งที่มีการควบคุมปริมาณการใช้สารส้มด้วยวิธีทำจาร์เทสแล้วปรับปริมาณการสั่งจ่ายสารวันละสองครั้งตลอดระยะเวลา 3 เดือน เพื่อทดสอบความเป็นไปได้และประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องเอสซีเอ็ม โดยเริ่มจากการทำจาร์เทสวิเคราะห์หาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบ เพื่อทำการจ่ายเข้าสู่ถังตกตะกอนและตั้งค่าเริ่มต้นเอสซีเอ็มเป็นศูนย์ ตลอดระยะเวลาเก็บข้อมูล พบว่าค่าความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในช่วงเดือนที่หนึ่ง และค่อนข้างคงที่ในเดือนที่สองตาม Figure 3 (B) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 30-50 เอ็นทียู การจ่ายสารส้มของถังตกตะกอนที่มีการควบคุมด้วยเครื่องเอสซีเอ็มมีปริมาณลดลงในช่วงเดือนที่หนึ่งและค่อนข้างคงที่ในช่วงเดือนที่สอง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความขุ่นในน้ำดิบ ขณะที่การจ่ายสารส้มในถังตกตะกอนที่ถูกควบคุมด้วยจาร์เทสไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าความขุ่นของน้ำดิบดังแสดงใน Figure 3 (A) แต่ปรากฏว่าในช่วงเดือนที่สามเมื่อค่าความขุ่นของน้ำดิบลดลงต่ำกว่า 30 เอ็นทียู การเปลี่ยนแปลงปริมาณการจ่ายสารส้มของทั้งสองถังเริ่มมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

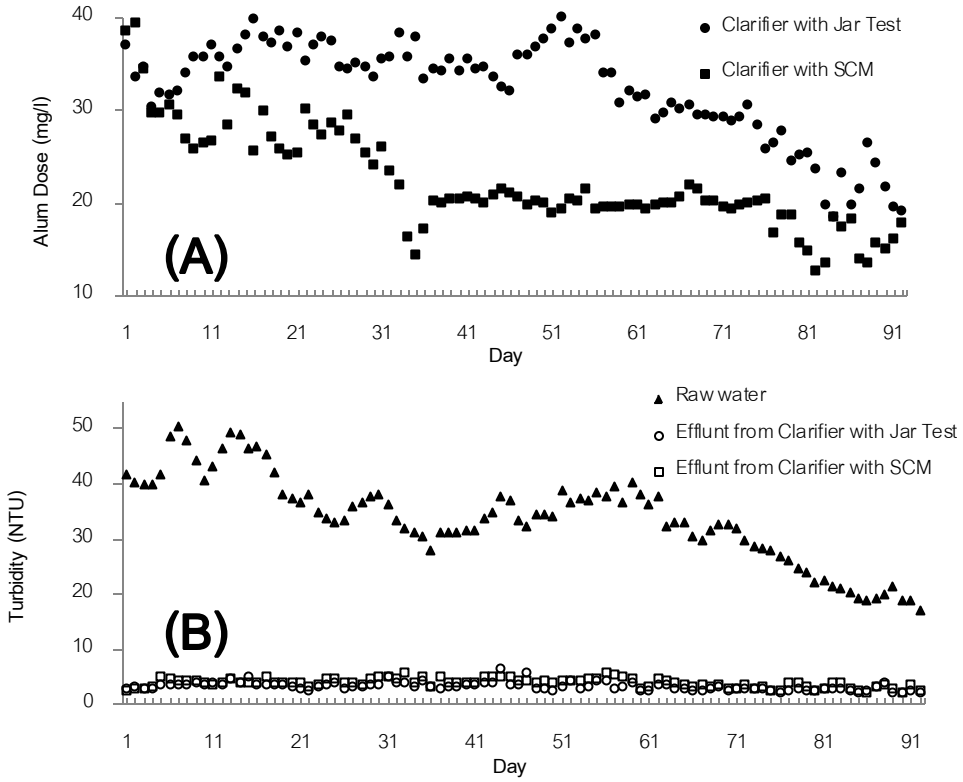


Figure 3 Alum use during October to December 2014 (A), Effluent Turbidity (B)

ตลอดระยะเวลาทดสอบเป็นเวลา 3 เดือน คุณภาพน้ำหลังการตกตะกอนอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการก่อนส่งเข้าสู่บ่อกรอง แม้ว่าค่าความขุ่นคงเหลือเฉลี่ยจากถังตกตะกอนที่ถูกควบคุมด้วยเครื่องเอสซีเอ็มมีค่าสูงกว่าถังที่ถูกควบคุมด้วยวิธีจาร์เทสประมาน 0.8 เอ็นทียู อย่างไรก็ตามปริมาณการใช้สารส้มลดลงเฉลี่ย 10 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อถังตกตะกอนถูกควบคุมการจ่ายสารส้มด้วยเครื่องเอสซีเอ็ม

ตารางที่ 3 (Table 3) แสดงค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำหลังการตกตะกอนตลอดระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งพบว่า ค่าพีเอช, อุณหภูมิ, การนำไฟฟ้า และความกระด้างทั้งหมด ของทั้งสองถังมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่าความเป็นด่างของถังตกตะกอนที่ใช้วิธีจาร์เทสต่ำกว่าถังที่ใช้เครื่องเอสซีเอ็มเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของการใช้ปริมาณสารส้มที่แตกต่างกัน และยังส่งผลให้ค่าของแข็งละลายน้ำแตกต่างกันด้วย (T.D. and Richards, P.A., 1996) ส่วนค่าความเข้มข้นของอลูมิเนียมพบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าความขุ่นคงเหลือในน้ำ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกลไกการเกิดตะกอนที่ใช้ช่วงปริมาณสารส้มแตกต่างกัน

Table 3 Effluent Quality from solid contact clarifiers

Parameters	Jar Test		SCM	
	mean	S.D.	mean	S.D.
pH	7.3	0.4	7.3	0.2
Temp (˚C)	29	1.0	29	1.0
Turbidity (NTU)	2.8	0.7	3.6	0.8
Conductivity (µS/cm)	272	22.7	268	23.6
Total Hardness (mg/l)	86	4.1	86	4.4
Alkalinity (mg/l as$CaCo^3$)	82	7.3	87	5.5
Color	6	3.9	9	7.2
Total Dissolved Solid (mg/l)	179	32.2	175	28.3
Aluminum (mg/l)	0.171	0.04	0.182	0.05

สรุป

น้ำดิบที่มีความขุ่นตามธรรมชาติและสารละลายสารส้มเมื่อทำปฏิกิริยากับสภาพความเป็นด่างในน้ำ ถูกอ่านค่าด้วยเครื่องเอสซีเอ็มได้เป็นลบและบวกตามลำดับ เมื่อตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องเอสซีเอ็มเป็นศูนย์ ณ สภาวะที่มีการจ่ายสารส้มที่เหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบ สามารถใช้ควบคุมและปรับปริมาณการจ่ายสารแบบอัตโนมัติให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำดิบที่เข้าสู่ถังตกตะกอนแบบสัมผัสของแข็ง ณ โรงงานผลิตน้ำบางเขนได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีคุณภาพน้ำหลังการตกตะกอนอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการก่อนส่งเข้าสู่บ่อกรอง และสามารถลดปริมาณการใช้สารส้มได้เฉลี่ยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารอ้างอิง

APHA, AWWA and WEF, 1998. **Standard Methods for The Examination of Water And Wastewater.** 21th edition Office of the National environmental Board

Daniel Edney (2005) **Introduction to the Theory of the Streaming Current Meter**

Dentel S. K. and Kingery K. M. (1989) **Use of streaming current detectors in water treatment**. J. Am. Wat. Wks Ass. In press.

Dentel S. K., Thomas A. V. and Kingery K. M. (1989) **Evaluation of the Streaming Current Detector I. Use in jar tests**. Water Research. 23, 413-421

T.D. and Richards, P.A. (1996) **Unit operations and Processes in Environmental Engineering**, 2nd edition, New York: McGraw - Hill

การพัฒนาแบบจำลองปริมาณน้ำหลากในลุ่มน้ำน่าน

Development of Flood Routing Models for Nan River Basin

ภัทรวุฒิ พงศ์วุฒิศักดิ์[1*] และ วินัย เลียงเจริญสิทธิ์ [1]

Pattharawut Pongwuttisak[1*] and Winai Liengcharoensit [1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์คำนวณปริมาณการไหลของน้ำในลุ่มน้ำน่านโดยทำการประเมินปริมาณน้ำหลากในช่วงที่มีพายุนกเต็นพัดผ่านประเทศไทย ในช่วงวันที่ 31 กรกฎาคมถึง 4 สิงหาคม พ.ศ. 2554 จากการคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำในลุ่มน้ำโดยอาศัยสมการการไหลบ่าของน้ำในพื้นดินและสมการการไหลบ่าของน้ำในลุ่มน้ำมาพัฒนาแบบจำลอง โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งพื้นที่เป็นเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญคือปริมาณน้ำฝน ความลาดชันของพื้นที่ ลักษณะการใช้ที่ดิน และสภาพความขรุขระของลำน้ำ จากผลการศึกษาทำให้ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ในการคำนวณอัตราการไหลตามแนวตั้งฉากและอัตราการไหลตามแนวขนานกับลำน้ำ ซึ่งอัตราการไหลตามแนวตั้งฉากต่อหน่วยความกว้างจะเป็นอัตราการระบายน้ำท่าลงสู่ลำน้ำต่อหน่วยความยาวของลำน้ำ จากนั้นจึงใช้แบบจำลองคำนวณอัตราการไหลตามลำน้ำที่เวลาต่างๆ โดยใช้ค่าอัตราการระบายน้ำท่าลงสู่ลำน้ำต่อหน่วยความยาว จากนั้นนำค่าปริมาณน้ำมาเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่เกิดจริงในสถานีวัดน้ำโดยผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นยังแตกต่างจากค่าจริงอยู่บ้างอาจเกิดจากข้อมูลที่ผิดพลาดในตัวแปรที่สำคัญ

ABSTRACT

This research aims to develop a mathematical model to calculate flow of water in the Nan River Basin. By the estimation of the flood during a storm Nock-ten through Thailand during 31 July to 4 August 2011. Several model are developed including overland flow model and kinematic stream flow model .Finite element method is used in model development The major parameter is rainfall data, slope of the area, land use and roughness of the river. The study of mathematical models that can be used to calculate the flow rate along the perpendicular and parallel to the river. The rate of flow perpendicular is the flow rate of runoff into the river. Then use the model to calculate the flow rate of the river at different times. Using the rate of runoff into the river. The results were compared with the water in runoff station. The results of the model is also different from what actually caused by error in important parameters.

Key Words: flood routing models, Nan river basin, finite element method, flood warning

* Corresponding author; e-mail address: pat_mankung@hotmail.com

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ทรัพยากรที่สำคัญของมนุษย์ในการดำเนินชีวิตใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ก็คือน้ำประเทศไทยนั้นมีลุ่มน้ำที่สำคัญมากมายลุ่มน้ำน่านนั้นก็เป็นส่วนหนึ่งโดยมีแม่น้ำน่านเป็นแม่น้ำสายหลัก แม่น้ำน่านมีต้นกำเนิดอยู่ที่ดอยภูแวในเทือกเขาหลวงพระบางจังหวัดน่าน มีความยาวตลอดลำน้ำ 615 กิโลเมตรนับเป็นหนึ่งในแม่น้ำสายหลักในภาคเหนือไทย มีพื้นที่ลุ่มน้ำรวมทั้งสิ้น 34,682 ตร.กม.ประกอบด้วยพื้นที่ 8 จังหวัดคือ กำแพงเพชร นครสวรรค์ น่าน พิจิตร พิษณุโลก เพชรบูรณ์ เลย สุโขทัย และอุตรดิตถ์ ส่วนประชากรในพื้นที่ลุ่มน้ำน่านนั้นมีทั้งสิ้น 2,275,534 คน

การเติบโตของประชากรอย่างรวดเร็วและการขยายตัวของเมืองในประเทศไทยในช่วงที่ผ่านนั้นได้เพิ่มความต้องการน้ำเพื่อการบริโภคในประเทศ เกษตรกรรม อุตสาหกรรม การขนส่ง นันทนาการ และการผลิตพลังงาน จากกิจกรรมของมนุษย์ มนุษย์จึงเป็นเหตุทำให้สมดุลในระบบนิเวศน้ำมีการเปลี่ยนแปลงในด้านปริมาณน้ำฝน และรูปแบบการไหลของกระแสน้ำที่เกิดขึ้นในภูมิภาคต่างๆ ซึ่งเป็นต้นเหตุให้ปัญหาการจัดการน้ำเกิดขึ้นบ่อยมากในปัจจุบันซึ่งอาจจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในไม่กี่ปีที่ผ่านมาน้ำท่วมใหญ่ที่เกิดขึ้นในหลายภูมิภาคของประเทศไทยก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและเศรษฐกิจ วิธีหนึ่งที่จะช่วยลดความเสียหายคือการพัฒนาระบบเตือนภัยขึ้นโดยจำเป็นต้องมีข้อมูลที่น่าเชื่อถือเกี่ยวกับข้อมูลของน้ำในแม่น้ำที่ไหลผ่านในพื้นที่ต่าง ๆ

สำหรับประเทศไทยก็ได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองในการคำนวณทางอุทกวิทยาและชลศาสตร์อย่างต่อเนื่อง และได้มีการใช้แบบจำลองในการคำนวณหาปริมาณน้ำในลำน้ำสายต่างๆในลุ่มน้ำ อาทิ ผลงานของ ทวีวงศ์ (2541), บุษปกร (1985), Komsai (2012)

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำในลุ่มน้ำน่าน วิธีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางด้านอุทกวิทยา และหลักการชลศาสตร์ในด้านต่าง ๆโดยการเขียนโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็เป็นวิธีหนึ่งในการพัฒนาเครื่องมือในการตรวจสอบวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นในพื้นที่ต่างๆของแม่น้ำน่านเพื่อที่จะให้ข้อมูลที่เชื่อถือได้สำหรับการจัดการปัญหาน้ำท่วมในกรณีที่เกิดพายุพัดผ่าน และในกรณีที่ฝนทิ้งช่วงเพื่อเป็นข้อมูลในการเตือนภัยและแก้ไขปัญหาความรุนแรงที่เกิดขึ้นต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณการไหลของน้ำท่าบนพื้นที่รับน้ำและการไหลของน้ำในลำน้ำมีวิธีการทดลองดังนี้

1. การพัฒนาแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยเทคนิค Galerkin's Weighted Residual เพื่อใช้คำนวณอัตราการไหลและระดับผิวน้ำในแต่ละช่วงของแม่น้ำสายหลักในพื้นที่ศึกษา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาแบบจำลองการคำนวณการไหลบ่าของน้ำหลากบนพื้นดิน (Overland flow) สำหรับการไหลบ่าของน้ำบนพื้นดินและแบบจำลองการไหลของน้ำหลากในลำน้ำ (Stream flow) เพื่อคำนวณในพื้นที่ศึกษา

สมการที่เกี่ยวกับแบบจำลองคณิตศาสตร์

การคำนวณการไหลของน้ำหลากจะแบบจำลองหลายแบบผสมผสานกัน ซึ่งได้แก่

1.1 <u>แบบจำลองการคำนวณการไหลบ่าของน้ำหลากบนพื้นดิน (Overland flow)</u> สำหรับการไหลบ่าของน้ำบนพื้นดิน ได้ใช้แบบจำลอง kinematic (Bedient et al., 2002) ซึ่งมีสมการพื้นฐานดังนี้

(ก) สมการความต่อเนื่อง:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial s}=i-f \qquad (1)$$

โดยที่ *h* เป็นความลึกของน้ำบนพื้นดิน (ม.) , *q* เป็นอัตราการไหลต่อหน่วยความกว้างตามทิศทางความลาดเอียงของพื้นที่ (ม^3/ม./วินาที), *i เป็นอัตราน้ำฝน* (ม./วินาที), *f เป็นผลรวมของอัตราการระเหย*การคายใบของพืช การเก็บกักตามแอ่งเหนือพื้นดิน และการไหลซึมลงดิน (ม./วินาที)

สำหรับการไหลแบบสองมิติ อัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง *q* สามารถแยกเป็น 2 ทิศทางดังนี้

$$q_x=q\cos\theta \quad \text{และ} \quad q_y=q\sin\theta \qquad (2)$$

โดยที่ q_x และ q_y เป็นอัตราการไหลต่อหน่วยความกว้างตามแนวแกน *x* และ *y* ตามลำดับ (ม^3/ม./วินาที), θ เป็นมุมที่แนวความลาดเอียงของพื้นที่ทำกับแนวแกน *x*

ดังนั้น สมการความต่อเนื่องจะเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}\cos\theta+\frac{\partial q}{\partial y}\sin\theta=i-f \qquad (3)$$

(ข) สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความลึกของน้ำ :

$$q=\alpha_o h^{m_o}=\frac{\sqrt{S_o}}{n_o}h^{m_o} \qquad (4)$$

โดยที่ α_o เป็น Conveyance factor = $\sqrt{S_o}/n_o$; S_o เป็นความลาดชันของพื้นดิน n_o เป็นสัมประสิทธิ์ความขรุขระของพื้นดิน m_o เป็นค่าคงที่ = 5/3 จากสมการของ Manning

1.2 <u>แบบจำลองการคำนวณการไหลของน้ำในลำน้ำย่อย (Stream flow)</u> สำหรับการไหลของน้ำในลำน้ำย่อยที่น้ำไหลทางเดียวไปยังลำน้ำสายหลักได้ใช้แบบจำลอง kinematic เช่นกัน (Bedient et al., 2002) ซึ่งมีสมการพื้นฐานดังนี้

(ก) สมการความต่อเนื่อง :

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q_s+q_u \qquad (5)$$

โดยที่ *A* เป็นพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ (ม^2), *Q* เป็นอัตราการไหลในลำน้ำ (ม^3/วินาที),

q_s เป็นอัตราการไหลของน้ำท่าเหนือพื้นดินที่ระบายลงตามแนวฝั่งลำน้ำ (ม^3/ม./วินาที) q_u เป็นอัตราการไหลซึมของน้ำใต้พื้นดินเข้าสู่ลำน้ำตามแนวฝั่งลำน้ำ (ม^3/ม./วินาที)

(ข) สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับพื้นที่หน้าตัดลำน้ำ :

$$Q=\alpha_c A^{m_c} \quad (6)$$

โดยที่ α_c และ m_c เป็น kinematic parameters ซึ่งขึ้นกับความลาดเอียงและลักษณะหน้าตัดลำน้ำ

2. การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.1 การรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิเพิ่มเติม

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบันที่เก็บ โดยหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง พัฒนาสมการสำหรับคำนวณการไหลของน้ำหลากโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนท์ (วินัย, 2530) ให้เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปสมการพีชคณิต

ในการศึกษาต่อไปนั้นได้รวบรวมข้อมูลทุติยภูมิเพิ่มเติมจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งรวมทั้งหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการน้ำ และจาก website ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลที่รวบรวมประกอบด้วย

2.1.1 แผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:250,000 และ 1:50,000 จากกรมแผนที่ทหาร

2.1.2 ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน จากกรมพัฒนาที่ดิน

2.1.3 ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ จากกรมอุตุนิยมวิทยา

2.1.4 ข้อมูลระดับน้ำและอัตราการไหลที่สถานีอุทกวิทยาในลำน้ำที่ศึกษาจากกรมชลประทาน

ข้อมูลปริมาณน้ำฝนราย 3 ชั่วโมงได้รับความอนุเคราะห์จากกรมอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลระดับน้ำและปริมาณน้ำในปี พ.ศ.2554 ได้รวบรวมจากเว็บไซต์ของกรมชลประทาน และสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตรโดยสถานีวัดปริมาณน้ำฝนในลุ่มน้ำน่านที่ใช้คำนวณได้แสดงใน Figure 1

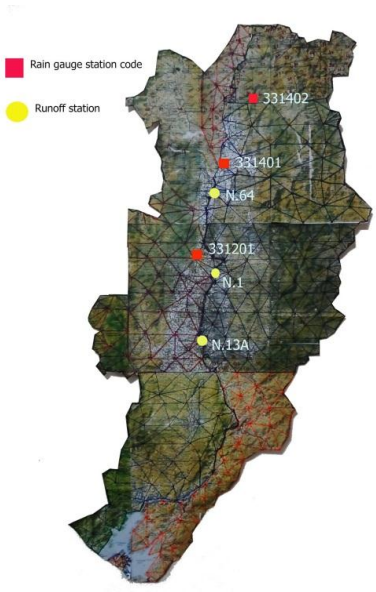


Figure1 Location of runoff stations and rainfall stations

2.2 การสำรวจภาคสนาม

จะมีการสำรวจภาคสนามเพื่อดูสภาพพื้นที่ศึกษา ซึ่งรวมทั้งพื้นที่ต้นน้ำลำธาร ลำน้ำสายหลักและลำน้ำสายย่อยในพื้นที่ลุ่มน้ำ ลักษณะภูมิประเทศ การใช้ที่ดิน ฯลฯ และเปรียบเทียบกับข้อมูลที่มีอยู่เดิมเพื่อให้ผู้ศึกษาทราบถึงสภาพที่แท้จริงในปัจจุบันของพื้นที่โครงการ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการคำนวณในขั้นต่อไปทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น นำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่บริเวณลุ่มน้ำน่าน

2.3 การปรับปรุงแบบจำลอง

ทำการปรับปรุงแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้สามารถใช้กับพื้นที่ย่อยแต่ละส่วนของลุ่มน้ำได้อย่างสะดวก

2.4 การทดสอบและปรับเทียบแบบจำลอง

เมื่อได้ปรับปรุงแบบจำลองแล้วจะนำแบบจำลองมาทดสอบ โดยนำมาใช้กับพื้นที่บางส่วนของลุ่มน้ำที่มีข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณค่อนข้างสมบูรณ์ และตรวจสอบว่าผลการคำนวณจากแบบจำลอง ซึ่งหมายถึงปริมาณน้ำในลำน้ำที่ค่าอัตราน้ำฝนต่างๆ ในพื้นที่ตรงกับข้อมูลที่ตรวจวัดในภาคสนามหรือไม่ ทำการปรับเทียบและปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ

2.5 **การทดสอบแบบจำลอง** เมื่อได้ปรับปรุงข้อมูลแบบจำลองแล้วจากนั้นนำแบบจำลองมาทดสอบโดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Matlab (โศรฎา, ม.ป.ป.)คำนวณหาปริมาณน้ำในลำน้ำสายหลัก

2.6 การประยุกต์ใช้แบบจำลองในลำน้ำสาขาของแม่น้ำน่าน

หลังจากที่ได้ทดสอบและปรับเทียบแบบจำลองแล้ว จะนำแบบจำลองมาประยุกต์ใช้กับลำน้ำสาขาของแม่น้ำน่าน โดยจะมีการปรับเทียบแบบจำลองเพื่อให้การคำนวณในแต่ละลำน้ำย่อยสอดคล้องกับค่าที่มีการตรวจวัดและบันทึกไว้โดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการพัฒนาแบบจำลอง

ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ใช้งานได้ทั้งในส่วนของแบบจำลองแบบจำลองการคำนวณการไหลบ่าของน้ำหลากบนพื้นดิน (Overland flow) โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนท์ นำสมการที่ 3 และ 4 มาคำนวณด้วยเทคนิค Galerkin's Weighted Residual จะได้สมการของระบบดังนี้

$$\boldsymbol{M}\frac{d\boldsymbol{H}}{dt}+\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{hx}}+\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{hy}}-\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{i}}+\boldsymbol{M}_{f}=\boldsymbol{0} \qquad (7)$$

โดยที่ $\boldsymbol{M}=\iint_{\Omega}\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}dA$, $\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{hx}}=\iint_{\Omega}\left\{m\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{\alpha}_{\boldsymbol{x}}\left(\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{H}\right)^{m-1}\frac{\partial\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}}{\partial x}\boldsymbol{H}\right\}dA$,

$$\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{hy}}=\iint_{\Omega}\left\{m\boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{\alpha}_{\boldsymbol{y}}\left(\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{H}\right)^{m-1}\frac{\partial\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}}{\partial y}\boldsymbol{H}\right\}dA,\ \boldsymbol{M}_{\boldsymbol{i}}=\iint_{\Omega}\boldsymbol{N}idA,\ \boldsymbol{M}_{\boldsymbol{f}}=\iint_{\Omega}\boldsymbol{N}fdA$$

จากนั้นวิธี Runge-Kutta สามารถใช้ในการคำนวณคำตอบของชุดสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งนี้ได้ เมื่อได้ค่าความลึกน้ำ H_i ที่แต่ละ node สามารถหาอัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง q_i ที่แต่ละ node ได้จากสมการ

$$q_i = \alpha_i H_i^{\,m} = \frac{\sqrt{S_i}}{n_i} H_i^{\frac{5}{3}} \qquad (8)$$

ต่อมาได้พัฒนาแบบจำลองการคำนวณการไหลของน้ำในลำน้ำย่อย (Stream flow) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนท์ โดยนำสมการที่ 5 และ 6 มากคำนวณด้วยเทคนิค Galerkin's Weighted Residual จะได้สมการของระบบดังนี้

$$\boldsymbol{M}\frac{d\boldsymbol{A}}{dt} + \boldsymbol{M_a} + \boldsymbol{M_b} - \boldsymbol{M_{qi}} + \boldsymbol{M_{qo}} = \boldsymbol{0} \qquad (9)$$

โดยที่ $\boldsymbol{M} = \iint_{\Omega} \boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}} dA$, $\boldsymbol{M_a} = \int_{\Omega} m_c \boldsymbol{N}\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{\alpha_c} \left(\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{A}\right)^{m_c-1} \frac{\partial \boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}}{\partial x} \boldsymbol{A} dx$

$\boldsymbol{M_b} = \int_{\Omega} \boldsymbol{N}\left(\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{A}\right)^{m_c} \frac{\partial \boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}}{\partial x} \boldsymbol{\alpha_c} dx$, $\boldsymbol{M_{qi}} = \int_{\Omega} q_i \boldsymbol{N} dx$, $\boldsymbol{M_{qo}} = \int_{\Omega} q_o \boldsymbol{N} dx$

วิธี Runge-Kutta สามารถใช้ในการคำนวณคำตอบของชุดสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งนี้ได้ เมื่อได้ค่าพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ A_i ที่แต่ละ node สามารถหาอัตราการไหล Q_i ที่แต่ละ node ได้จากสมการ

$$Q_i = \alpha_{ci} A_i^{m_c} \qquad (10)$$

ผลประยุกต์การใช้แบบจำลอง

ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ปรับปรุงมาใช้กับพื้นที่ลุ่มน้ำน่าน โดยทำการประเมินปริมาณน้ำหลากในช่วงที่มีพายุนกเต็นพัดผ่านประเทศไทย ในช่วงวันที่ 31 กรกฎาคม – 4 สิงหาคม พ.ศ. 2554 และได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองเพื่อให้ผลจากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลที่ตรวจวัดโดยสถานีอุทกวิทยาของกรมชลประทาน

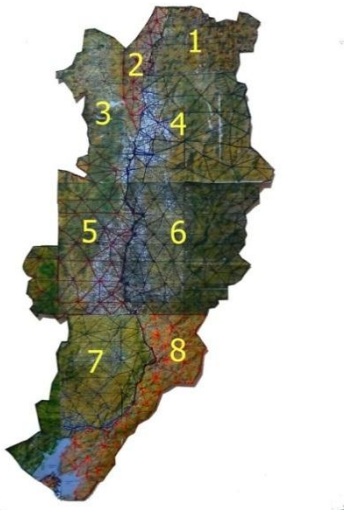


Figure 2 Division of Nan catchment

ในขั้นแรกทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนต่าง ๆ (Figure 2) จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราการไหลบ่าของน้ำจากพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยแต่ละพื้นที่เมื่อมีฝนตกโดยใช้แบบจำลอง Kinematic overland flow model ซึ่งจะได้ค่าอัตราการไหลต่อหน่วยความกว้างที่ node ต่างๆ ที่กำหนดในแต่ละพื้นที่ในแต่ละช่วงเวลา (time step) ในที่นี้ได้

ใช้เอลิเมนท์รูปสามเหลี่ยมทำการคำนวณหาอัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง q_x และ q_y ที่ node ตามแนวฝั่งลำน้ำจะปรับเป็นอัตราการไหลตามแนวตั้งฉากและอัตราการไหลตามแนวขนานกับลำน้ำ ซึ่งอัตราการไหลตามแนวตั้งฉากต่อหน่วยความกว้างจะเป็นอัตราการระบายน้ำท่าลงสู่ลำน้ำต่อหน่วยความยาวของลำน้ำ จากนั้นจึงใช้แบบจำลอง Kinematic stream flow routing model คำนวณอัตราการไหลที่ node ต่าง ๆ ที่กำหนดตามลำน้ำที่เวลาต่างๆ โดยใช้ค่าอัตราการระบายน้ำท่าลงสู่ลำน้ำต่อหน่วยความยาวที่คำนวณได้ข้างต้นเป็นข้อมูล

จากผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการคำนวณอัตราการไหลของน้ำในแม่น้ำน่านได้ นำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำของกรมชลประทาน (Figure 3-4) ได้ผลดังนี้

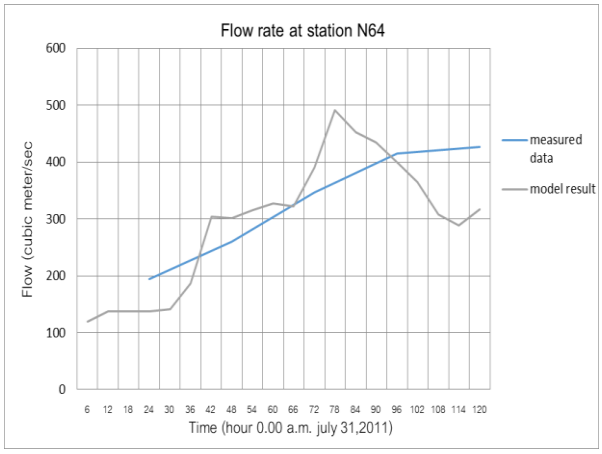


Figure 3 Flow rate at station N64

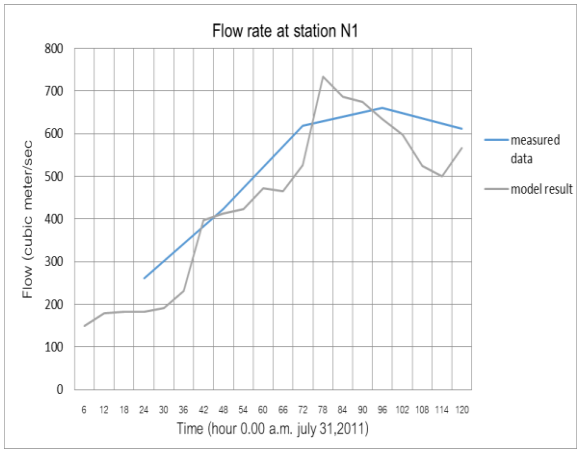


Figure 4 Flow rate at station N1

จากการเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าที่คำนวณกับสถานีตรวจวัด พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นยังแตกต่างจากค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสถานีตรวจวัดอยู่บ้างแต่พบว่ายังคงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าจริงที่ได้จากสถานีตรวจวัด จึงสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้เป็นข้อมูลในการเตือนภัยน้ำท่วมที่เกิดขึ้นบนพื้นที่จริงได้

สรุป

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณการไหลของน้ำทั้งบนพื้นที่รับน้ำและในลำน้ำ จากผลการวิจัยพอสรุปได้ดังนี้

1) การใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากสมการพื้นฐานที่อธิบายหลักการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำทำให้จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ปรับเทียบแบบจำลองมีไม่มากนักซึ่งตามแบบจำลองประเภทนี้ต้องอาศัยข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ค่อนข้างละเอียดเพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง

2) เมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับลุ่มน้ำน่าน พบว่าผลที่คำนวณได้ในแม่น้ำน่านยังแตกต่างจากผลที่วัดที่สถานีวัดน้ำพอสมควร สาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่สำคัญได้แก่ ความจำกัดของจำนวนสถานีวัดน้ำฝน ข้อมูลพื้นที่หน้าตัด และความกว้างของลำน้ำ รวมทั้งความถูกต้องแม่นยำของข้อมูลการใช้ที่ดิน ความลาดชันของพื้นที่และลำน้ำ

3) ข้อมูลด้านอุทกธรณีวิทยาก็เป็นข้อมูลที่จำเป็นในการประเมินการไหลของน้ำใต้พื้นดินที่เกิดจากการไหลซึมลงดินของน้ำฝน ซึ่งจะค่อยๆ ระบายลงสู่ลำน้ำใกล้เคียงในที่สุด ข้อมูลนี้มิได้นำมาพิจารณาในที่นี้ แต่ใช้การปรับเทียบระยะเวลาที่น้ำใต้พื้นดินไหลออกสู่ลำน้ำนับตั้งแต่ฝนตก

เอกสารอ้างอิง

ทวีวงศ์ ศรีบุรี .2541 .**การประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการจัดการคุณภาพน้ำในลำน้ำธรรมชาติ**,รายงานฉบับสมบูรณ์.410 .

บุษปกร ขันติธีระกวี. 2555. **การประยุกต์แบบจำลอง** HEC-RAS **เพื่อการจัดการน้ำท่วมในลุ่มน้ำน่านส่วนบน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วินัย เลียงเจริญสิทธิ์ .2530 .**วิธีไฟไนท์อิเลเมนต์** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา .**ทฤษฎีและการประยุกต์** :คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

โศรฎา แข็งการและกนต์ธร ชำนิประศาสน์. ม.ป.ป. **การใช้** MATLAB **สำหรับงานวิศวกรรม**. ภาควิชาวิศวกรเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Komsai, A. 2012. **Formulation of Flood Routing Model Using Finite Element Method with Application to the Upper Ping River Basin**. M.E. Thesis, Kasetsart University.

Bedient, P.B. and W.C. Huber. .2002 **Hydrology and Floodplain Analysis3 rd Edition**. Prentice Hall, Inc. NJ.

การลดความเค้นหนาแน่นของแผ่นสี่เหลี่ยมมีรูตรงกลางภายใต้แรงดึงตามแนวแกนโดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

The Reduction of Stress Concentration in a Rectangular Plate with a Central Circular Hole Under Axial Tension Force Using Finite Element Method

วัชระ เครือรัฐติกาล[1*] กรรมมันต์ ชูประเสริฐ[1] และ ชาญเวช ศิลพิพัฒน์[1]

Watchara Kruerattikarn[1*], Kummun Chooprasirt[1] and Chanwech Seenpipat[1]

บทคัดย่อ

พื้นฐานในการคำนวณวิเคราะห์ความเค้น สมมติว่าชิ้นงานมีความราบเรียบ หน้าตัดสม่ำเสมอ และ ไม่มีความผิดปกติ ในทางปฏิบัติ แทบทุกชิ้นงานทางวิศวกรรมอย่างน้อยมีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด และหรือ รูปทรงภายใต้ภาระงาน การเปลี่ยนแปลงรูปทรง ทำให้ความเค้นของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และนำไปสู่ความเสียหายของชิ้นส่วนเนื่องจากความเค้นหนาแน่นสูง การกระจายตัวของความเค้นจะไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานสี่เหลี่ยมมีรูกลมตรงกลางภายใต้แรงดึงตามแนวยาวของชิ้นงาน วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้เพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้น ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสามารถลดได้ถึง 19.8 % สำหรับใช้สองรูช่วย และ 22.2 % สำหรับใช้สองรูวงรีช่วย โดยวางตำแหน่งทั้งสองด้านของรูวงกลมหลัก ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการมีรูช่วยหรือรูวงรีช่วย โดยวางตำแหน่ง ขนาด ที่เหมาะสม ทำให้การไหลของความเค้นราบเรียบขึ้น

ABSTRACT

Basic stress analysis calculations assume that the components are smooth, uniform section and no irregularities. In practice virtually all engineering components have at least minimal changes in section and/or shape. Under loads, these changes in geometry increase the local stress fields of the components quite significantly, and this will lead to failure of the component of high stress concentration. The stress distribution is not uniform throughout the cross section, when a central circular hole is introduced in a rectangular plate under axial tension force. Finite element method is used to study for the stress reduction. The stress concentration factor can be reduced up to 19.8 % for using two auxiliary holes and up to 22.2 % for using two auxiliary ellipse hole by locate auxiliary holes on either side of main central circular hole. Results reveals that the introduction of the auxiliary holes or auxiliary ellipse hole at a optimum location and sizes helps to smooth flow of the stress pass through the plate.

Key Words :Finite element, Stress concentration factor, single circular hole, Tension load, Auxiliary hole

* Corresponding author; e-mail address: fengwkr@ku.ac.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในการออกแบบชิ้นงานต่าง ๆ ในทางวิศวกรรม ขนาดหน้าตัดของชิ้นงานมักมีขนาดไม่คงที่ตลอดชิ้นงาน ทำให้มีค่าความเค้นหนาแน่นเกิดขึ้นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัด ซึ่งค่าความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นเป็นส่วนสำคัญที่นักออกแบบต้องคำนึงถึงและมีความระมัดระวัง ชิ้นงานในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่หน้าตัดเมื่อมีภาระงานมากระทำ ทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นเกิดขึ้นสูงในบริเวณนี้ แสดงให้เห็นว่าการไหลของความเค้นไม่ราบเรียบ อาจเกิดความเสียหายของชิ้นงานได้ การศึกษาและออกแบบการทำให้ความเค้นหนาแน่นบริเวณนี้ลดลง โดยไม่เปลี่ยนวัสดุหรือเพิ่มความหนาหรือขนาดของชิ้นงาน จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อที่ไม่ทำให้ต้นทุนการผลิตชิ้นงานนี้สูงขึ้นมากเกินไป

เมื่อมีภาระงานดึงมากระทำตามแนวยาวของชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีรูวงกลมเดี่ยวอยู่ตรงกลาง ทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นบริเวณขอบของรูวงกลมสูง Erickson และ Riley (1978) ได้ทำการทดลองใช้วิธีโฟโตอีลาสติก โดยให้ รูช่วยวางไว้ก่อนและหลังแนวของรูกลมเดี่ยวของชิ้นงานตามแนวของภาระงานที่กระทำ ผลที่ได้ช่วยลดความเค้นหนาแน่นของชิ้นงานลง 13% - 21% Meguid (1986) ได้ใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์หาวิธีการลดค่าความเค้นหนาแน่นของชิ้นงานที่มีรูกลมตรงกลางของชิ้นงานที่รับภาระตามแนวแกนเดี่ยว โดยใช้สองรูช่วย ทำให้ลดค่าความเค้นหนาแน่นได้ 7.5% - 11 % Giare et al. (1989) นำเสนอเทคนิคการลดความเค้นหนาแน่นรอบรูวงกลมหลักของแผ่นสี่เหลี่ยม โดยใช้วงแหวนเสริมแรงรอบรูวงกลมหลักทำให้ลดค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่น (stress concentration factor) ลงจาก 2.72 เป็น 1 Meguid และ Gong (1993) ได้ศึกษาความเค้นหนาแน่นบริเวณรอบรูกลมเดี่ยวบนแผ่นสี่เหลี่ยม ด้วยการทดลองโดยใช้วิธีโฟโตอีลาสติก และนำผลเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้มีค่าใกล้กัน Tenchev et al. (1995) นำเสนอวิธีการลดความเค้นหนาแน่นของรูวงกลมโดยการเสริมแผ่นเสริมแรงบริเวณรูวงกลมทั้งด้านบนและล่างทำให้บริเวณรอบรูวงกลม ทำให้บริเวณนั้นมีความหนามากขึ้น Ulrich และ Moslehy (1995) นำเสนอวิธีการบาวน์ดารี เอลิเมนต์ ใช้วิเคราะห์เพื่อลดความเค้นหนาแน่นของรูวงกลม และวงรีโดยใช้รูช่วย Toubal et al.(2005) ได้ศึกษาทดลองเพื่อหาความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบริเวณรูกลมของแผ่นคอมโพสิต Younis (2006) ได้ทำการทดลองโดยใช้วิธีโฟโตอีลาสติกศึกษาการประกอบความเค้นบริเวณรูกลมเพื่อลดความเค้นหนาแน่น Yang et al. (2010) ได้ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาความเค้นและความเครียดหนาแน่นของรูกลมบนแผ่นชิ้นงานหนาที่รับแรงดัด Sburlati (2013) ได้วิเคราะห์การลดความเค้นหนาแน่นบริเวณรูกลมของแผ่น โดยการสวมใส่แหวนลงไปในรูกลมที่ทำการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบริเวณรูวงกลมเดี่ยวตรงกลางของชิ้นงานสี่เหลี่ยม ภายใต้แรงดึงตามแนวแกน และทำการวิเคราะห์เพื่อลดความเค้นหนาแน่นสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของรูหลักโดยใช้รูช่วย 2 รู โดยวางเรียงซ้อนทั้งสองด้านของรูวงกลมเดี่ยวตรงกลางชิ้นงาน ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ 3 รูปแบบ ดังแสดงตาม Figure 1 โดย model A มีรูหลักเพียงรูเดี่ยว model B มีรูหลักและรูช่วย 2 รู และ model C มีรูหลักและรูวงรีช่วย 2 รู โดย model A ทำการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการวิจัยของ Howland (1929-1930) เพื่อยืนยันรูปแบบ

โมเดลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ว่าสามารถ นำไปใช้ใน model B และ Model C ได้ model B ทำการเปลี่ยนขนาดของรูช่วย d_1 และระยะห่าง S_1 model C ทำการเปลี่ยนขนาดของรูวงรีช่วย a และ b และระยะห่าง S_2

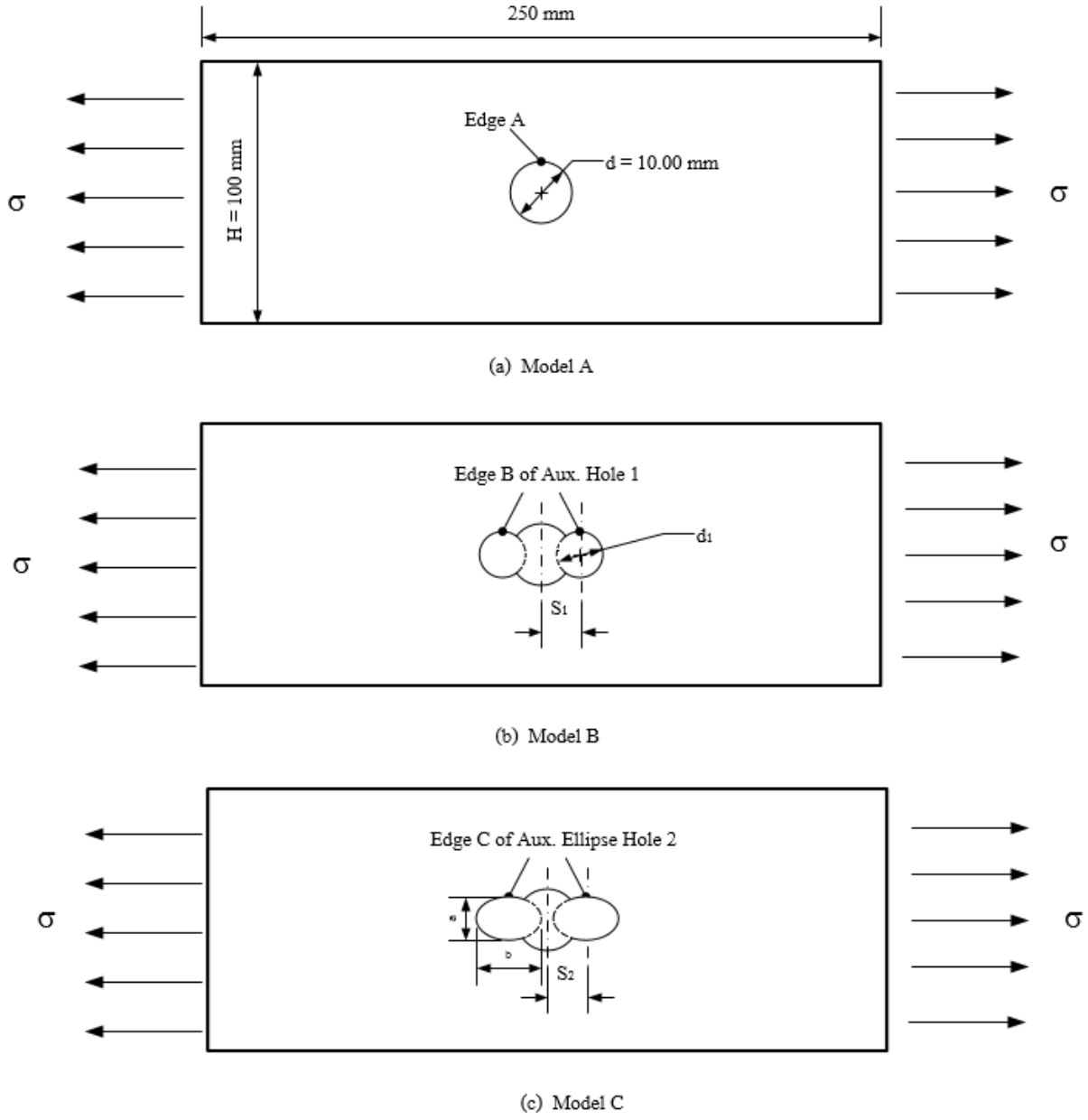


Figure 1 Details of three models analyzed in this study.

ขนาดของแผ่นสี่เหลี่ยมมีรูตรงกลางตาม Figure 1 โดยมีความกว้าง H เท่ากับ 100 มิลลิเมตร และความยาว 250 มิลลิเมตร ขนาดของรูหลักตรงกลางชิ้นงานมีขนาด 10 มิลลิเมตร การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ กำหนดให้หน้าตัดด้านซ้ายมือของชิ้นงานไม่ยอมให้มีการเคลื่อนตัว และหน้าตัดด้านขวามือมีแรงดึงตามแนวแกนขนาด 100 นิวตัน กระทำกระจายสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ขนาดของเอลิเมนต์ 2 มม. จำนวน 29 912 เอลิเมนต์

ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นตามแนวพิกัดเชิงขั้ว ถูกนำเสนอโดย Timoshenko และ Goodier (1970) แสดงตาม Figure 2

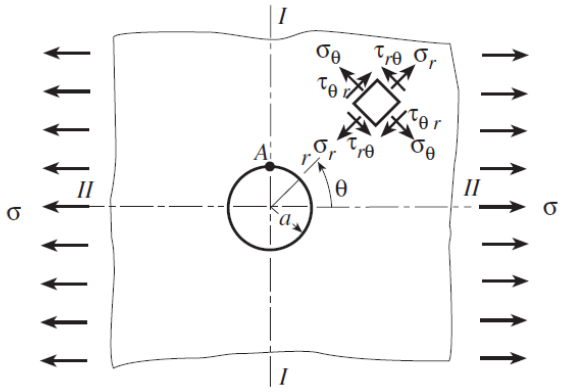


Figure 2 Infinite thin element with hole under tensile load.

$$\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)+\frac{1}{2}\sigma\left(1-\frac{4a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \qquad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}\sigma\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)-\frac{1}{2}\sigma\left(1+\frac{3a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \qquad (2)$$

พิจารณาที่หน้าตัด *I-I* ที่ค่ามุม $\theta = \pi/2$ สมการที่ 2 เปลี่ยนเป็น

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}\sigma\left(2+\frac{a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right) \qquad (3)$$

จาก Figure 1 (a) Model A พิจารณาที่ขอบด้านบนสุดตรงกลางของชิ้นงาน ค่า a = 5 และ r = 50 นำไปแทนค่าในสมการที่ 3 ได้ $\sigma_\theta = 1.005\sigma$ ขนาดความเค้นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าขนาดความกว้างของชิ้นงานสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้

พิจารณาที่หน้าตัด *II-II* ที่ค่ามุม $\theta = 0$ สมการที่ 1 เปลี่ยนเป็น

$$\sigma_r = \frac{1}{2}\sigma\left(2-\frac{5a^2}{r^2}+\frac{3a^4}{r^4}\right) \qquad (4)$$

จาก Figure 1 (a) Model A พิจารณาที่ขอบด้านขาวมือตรงกลางของชิ้นงาน ค่า a = 5 และ r = 125 นำไปแทนค่าในสมการที่ 4 ได้ $\sigma_r = 0.996\sigma$ ขนาดความเค้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าขนาดความยาวของชิ้นงานสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้

ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่น (K_{tn}) คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$K_{tn} = \sigma_{max} / \sigma \qquad (5)$$

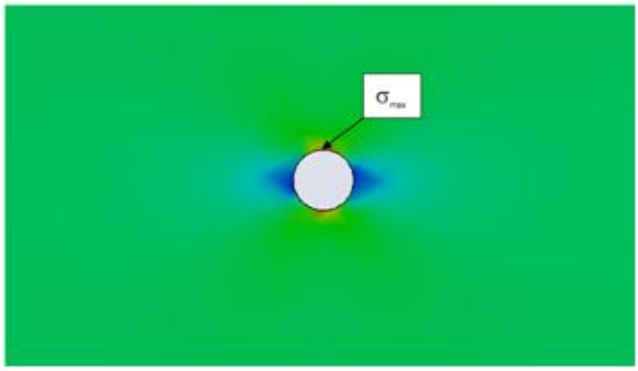
โดย σ_{max} คือ ความเค้นตั้งฉากสูงสุด

σ คือ ความเค้นตั้งฉากที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดของรูหลัก $A = t\,(H - d)$ โดยที่ t คือความหนาของชิ้นงาน

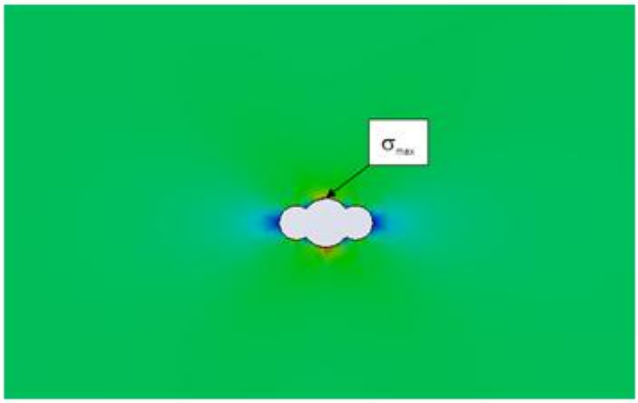
ผลและวิจารณ์ผลการคำนวณ

Model A การคำนวณโดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ σ_{max} มีค่าสูงสุดที่ขอบของรูหลัก ดังตำแหน่งที่แสดงใน Figure 3 และผลการคำนวณหาค่า K_{tn} ที่ตำแหน่ง σ_{max} ได้ 2.73 ซึ่งค่าที่ได้ถือว่าใกล้เคียงมากกับ Howland (1929-1930) ที่ 2.72

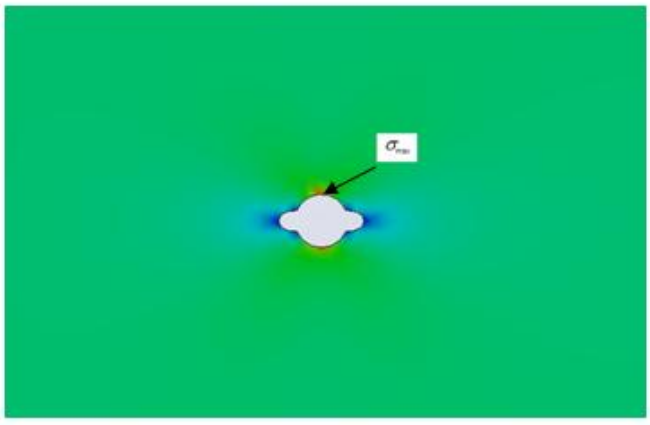
Model B และ Model C การคำนวณโดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ σ_{max} มีค่าสูงสุดที่ขอบของรูหลัก ดังตำแหน่งที่แสดงใน Figure 3 และผลการคำนวณหาค่า K_{tn} ที่ตำแหน่ง σ_{max} ค่าที่ได้แสดงใน Table 1 และ Table 2 ตามลำดับ



(a) Model A



(a) Model B



(a) Model C

Figure 3 Position of σ_{max} at the edge A of main hole in three models.

Table 1 Stress concentration factor at edge A of main hole in model B.

$S_1/d = 0.5$		$S_1/d = 0.6$		$S_1/d = 0.7$		$S_1/d = 0.8$		$S_1/d = 0.9$	
d_1/d	K_{tn}	d_1/d	K_{tn}	d_1/d	K_{tn}	d_1/d	K_{tn}	d_1/d	K_{tn}
0.4	2.827	0.4	2.805	0.4	2.793	0.4	2.781	0.4	2.765
0.5	2.786	0.5	2.760	0.5	2.742	0.5	2.721	0.5	2.695
0.6	2.724	0.6	2.689	0.6	2.667	0.6	2.643	0.6	2.615
0.7	2.625	0.7	2.591	0.7	2.558	0.7	2.532	0.7	2.501
0.8	2.473	0.8	2.432	0.8	2.401	0.8	2.375	0.8	2.338
0.9	2.265	0.9	2.240	0.9	2.215	0.9	2.201	0.9	2.181

Table 2 Stress concentration factor at edge A of main hole in model C.

$S_2/d = 0.5$			$S_2/d = 0.6$			$S_2/d = 0.7$			$S_2/d = 0.8$			$S_2/d = 0.9$		
a/d	a/b	K_{tn}	a/d	a/b	K_{tn}	a/d	a/b	K_{tn}	a/d	a/b	K_{tn}	a/d	a/b	K_{tn}
0.4	0.4	2.702	0.4	0.4	2.654	0.4	0.4	2.633	0.4	0.4	2.602	0.4	0.4	2.593
	0.5	2.726		0.5	2.677		0.5	2.651		0.5	2.635		0.5	2.619
	0.6	2.758		0.6	2.701		0.6	2.677		0.6	2.668		0.6	2.648
	0.7	2.787		0.7	2.735		0.7	2.709		0.7	2.694		0.7	2.674
	0.8	2.805		0.8	2.758		0.8	2.736		0.8	2.712		0.8	2.693
0.6	0.4	2.612	0.6	0.4	2.574	0.6	0.4	2.497	0.6	0.4	2.483	0.6	0.4	2.410
	0.5	2.633		0.5	2.597		0.5	2.528		0.5	2.501		0.5	2.443
	0.6	2.654		0.6	2.621		0.6	2.563		0.6	2.538		0.6	2.487
	0.7	2.688		0.7	2.645		0.7	2.596		0.7	2.567		0.7	2.519
	0.8	2.701		0.8	2.664		0.8	2.628		0.8	2.599		0.8	2.565
0.8	0.4	2.251	0.8	0.4	2.221	0.8	0.4	2.176	0.8	0.4	2.163	0.8	0.4	2.115
	0.5	2.294		0.5	2.266		0.5	2.218		0.5	2.200		0.5	2.174
	0.6	2.335		0.6	2.317		0.6	2.275		0.6	2.246		0.6	2.216
	0.7	2.375		0.7	2.356		0.7	2.323		0.7	2.281		0.7	2.257
	0.8	2.412		0.8	2.387		0.8	2.359		0.8	2.323		0.8	2.289

จาก Table 1 Model B ที่ $S_1/d = 0.5$ เมื่อ d_1/d มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า K_{tn} มีค่าลดลง และมีลักษณะความสัมพันธ์เดียวกัน กับที่ $S_1/d = 0.6$ $S_1/d = 0.7$ $S_1/d = 0.8$ และ $S_1/d = 0.9$ เมื่อพิจารณาที่ $d_1/d = 0.4$ เมื่อ S_1/d มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ ค่า K_{tn} มีค่าลดลง และมีลักษณะความสัมพันธ์เดียวกัน กับที่ $d_1/d = 0.5$ $d_1/d = 0.6$ $d_1/d = 0.7$ $d_1/d = 0.8$ และ $d_1/d = 0.9$

เมื่อนำค่าจาก Table 1 มาสร้างกราฟได้ความสัมพันธ์แสดงดัง Figure 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างรูหลัก และรูช่วย มีค่ามากขึ้นทำให้ค่า K_{tn} มีแนวโน้มลดลง ขณะที่ระยะห่างระหว่างรูหลักและรูช่วยคงที่ขนาดของรูช่วยมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ค่า K_{tn} มีแนวโน้มลดลง ค่า K_{tn} ใน model B สามารถลดลงได้สูงสุด 19.8 % เมื่อเปรียบเทียบกับ model A

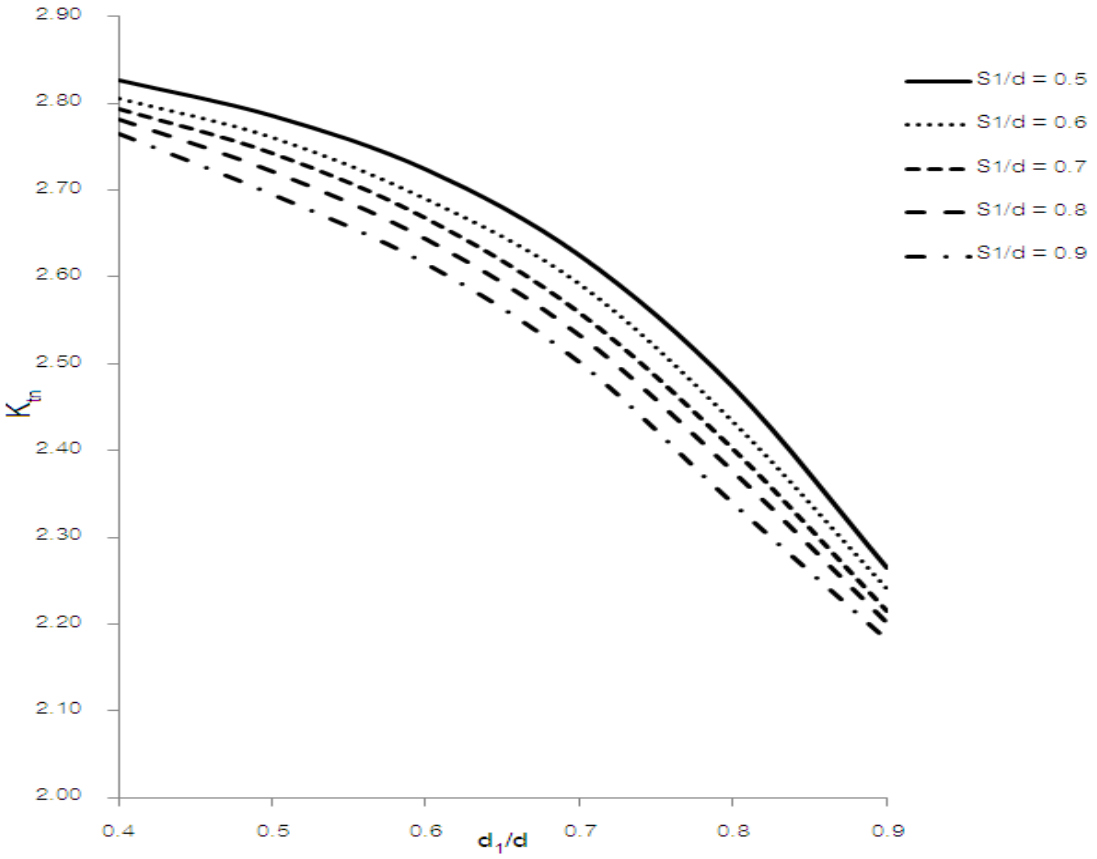


Figure 4 Effects of d_1/d on stress concentration factor at the edge A of the main hole in model B.

จาก Table 2 Model C เมื่อค่า S_2/d = 0.5 a/d = 0.4 คงที่ ถ้า a/b มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่า K_{tn} เพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์เดียวกันกับที่ a/d = 0.6 และ a/d = 0.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่า เมื่อค่า S_2/d ค่า a/d คงที่ ถ้าค่า a/b มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า K_{tn} เพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่า a/d และค่า a/b มีค่าคงที่ ค่า K_{tn} มีค่าลดลงตามค่า S_2/d ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำค่าจาก Table 2 มาสร้างกราฟ ได้ความสัมพันธ์แสดงดัง Figure 5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาด a/d คงที่ ขนาด a/b เพิ่มขึ้น ค่า K_{tn} มีแนวโน้นเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างรูหลักและรูวงรีช่วยเพิ่มขึ้น ค่า K_{tn} มีแนวโน้มลดลง ค่า K_{tn} ใน Model C นั้นสามารถลดลงได้สูงสุด 22.2 % เมื่อเทียบกับ Model A

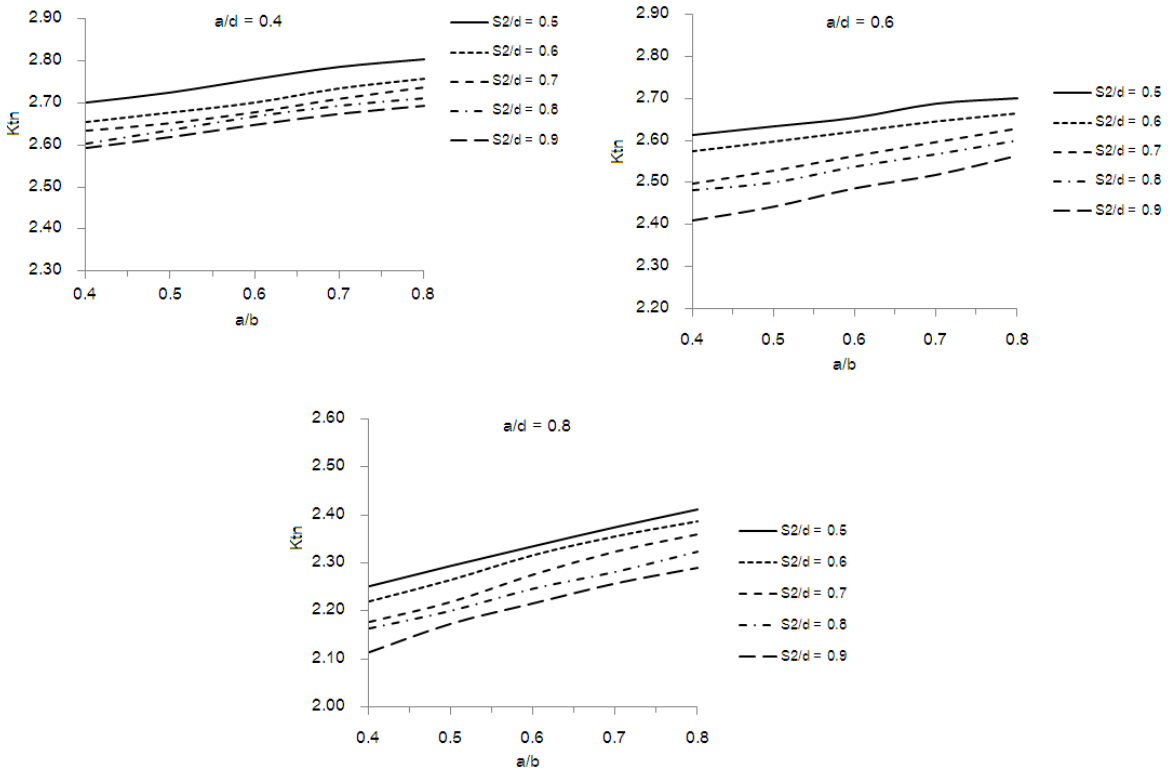


Figure 5 Effects of S_2/d and a/b on stress concentration factor at the edge A of the main hole in model C.

สรุป

การหาค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่น ของชิ้นงานสี่เหลี่ยมที่มีรูกลมอยู่ตรงกลาง ภายใต้แรงดึงตามแนวแกน โดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์นำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ถูกนำเสนอ การลดค่าความเค้นหนาแน่นโดยใช้รูช่วยสองรูใน Model B และรูวงรีช่วยใน Model C วางซ้อนก่อนและหลังของรูหลักทั้งสองด้านตามแนวยาวของชิ้นงาน ผลที่ได้ ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นใน Model B และ Model C สามารถลดลงได้สูงสุด 19.8 % และ 22.2 % ตามลำดับ เทียบกับค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นใน Model A เมื่อตัวประกอบความเค้นหนาแน่นลดลง ย่อมแสดงให้เห็นว่าระดับความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานลดลงด้วย หมายถึง การกระจายของความเค้นในชิ้นงานราบเรียบขึ้น ส่งผลให้อายุความล้าของชิ้นงานดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

Erickson, P.E., and Riley, W.F. 1978. Minimizing stress concentrations around circular holes in uniaxially loaded plates. **Experimental Mechanics**. 97-100.

Meguid, S. A . 1986. Finite element analysis of defence hole system for the reduction of stress concentration factor in a uni-axially loaded plate with two coaxial holes. **Engineering fracture mechanics**. 25 (4): 403-413.

Giare, G.S. and Shabahang, R. 1989. The Reduction of stress concentration around the hole in an isotropic plate using composite material. **Engineering fracture mechanics**. 32(5): 757-766.

Meguid, S.A. and Gong, S.X. 1993. Stress concentration around interacting circular holes: A comparison between theory and experiments. **Engineering Fracture Mechanics**. 44(2): 247-256.

Tenchev, R.T., Nygard, M.K. and Echtermeyer, A. 1995. Design procedure for reducing the stress concentration around circular holes in laminated composites. **Composites**. 26(12): 815-828.

Ulrich, T.W. and Moslesh, F.A. 1995. A boundary element method for stress reduction by optimal auxiliary holes. **Engineering Analysis with Boundary Elements**. 15: 219-233.

Toubal, L., Karama, M. and Lorrain, B. 2005. Stress concentration in a circular hole in composite plate. **Composite Structures**. 68: 31-36.

Younis, N.T. 2006. Assembly stress for the reduction of stress concentration. **Mechanics Research Communications**. 33: 837-845.

Yang, Z., Kim, C.B., Beom, H.G. and Cho, C. 2010. The stress and strain concentrations of out-of-plane bending plate containing a circular hole. **International Journal of Mechanical Sciences**. 52: 836-846.

Sburlati, R. 2013. Stress concentration factor due to a functionally graded ring around a hole in an isotropic plate. **International Journal of Solids and Structures**. 50: 3649-3658

Howland, R. C. J., 1929-1930. On the stress in the neighborhood of a circular hole in a strip under tension. Philosophical Transactions of the Royal (London) Society A. 229: 67

Pilkey, W.D., and Pilkey, D.F., 2008. **Peterson's stress concentration factors**. John Wiley & Sons. New Jersay.

Timoshenko, s.,and Goodier, J.N., 1970. **Theory of Elasticity**. McGraw-Hill, New York.

ผลกระทบจากความสูงของชั้นเชื้อเพลิงที่มีต่อการเผาไหม้ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้น

Effect of bed depth on characterization of coconut shell charcoal in an updraft gasifier

ภัทรพงษ์ คงได้[1*] ปฤษฐฤต สารพร[1] วิชัย ศิวะโกศิษฐ์[1] และ ชินธันย์ อารีประเสริฐ[1]

Pattarapong Kongdai[1*], Prysathryd Sarabhorn[1], Wichai Siwakosit[1] and Chinnathan Areeprasert[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความหนาของชั้นเชื้อเพลิงเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการจุดติดไฟโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลและพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะเผาไหม้ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความหนาของชั้นเชื้อเพลิงภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นและหาอัตราการสูญเสียเชื้อเพลิงซึ่งเป็นดัชนีที่สามารถบอกถึงอัตราการให้ความร้อนของเตาชีวมวลแบบไหลขึ้นได้โดยพบว่าตัวอย่างความหนาของชั้นเชื้อเพลิงที่ 60 เซนติเมตรจะมีระยะเวลารวมของการจุดติดไฟ ณ สภาวะ Steady-state ที่นานกว่าตัวอย่างความหนาของชั้นเชื้อเพลิงที่ 30 และ 15 เซนติเมตรตามลำดับและให้ค่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยระหว่างกระบวนการเผาไหม้สูงกว่าตัวอย่างความหนาชั้นเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า แต่มีอัตราการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงที่คล้ายกับตัวอย่างของชั้นเชื้อเพลิงที่ 30 เซนติเมตร แต่ช้ากว่าตัวอย่างความหนาของชั้นเชื้อเพลิงที่ 15 เซนติเมตร

ABSTRACT

This paper studies the effect of bed depth during gasification process of coconut shell charcoal in an updraft gasifier. This study has shown that the bed depth of 60 cm can produce the syngas that had ignitable duration longer than that of the bed depth of 30 and 15 cm. Moreover, the nominal temperature in the gasifier of the highest bed depth was higher than compared to other bed depth since it had higher amount of fuel and the combustion process can last longer. The mass loss at the bed depth of 15 cm is faster and the burnout time was shorter than that of the other bed depths. The difference of the mass loss profile of the bed depth 30 and 60 cm was not obvious.

Key Words: Updraft, gasifier, Effect of bed depth, Coconut Shell Charcoal, Temperature profile.

* Corresponding author; e-mail address: pattarapong_k@hotmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Departmen of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบันปัญหาด้านพลังงานได้สร้างผลกระทบกับหลายๆภาคส่วน ทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม เป็นเหตุให้รัฐบาลกำหนดให้การประหยัดพลังงานเป็นมาตรการระดับชาติ ซึ่งแนวทางที่จะทำให้บรรลุเป้าหมายของการประหยัดพลังงาน คือ การใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ลดการใช้พลังงานไปอย่างสิ้นเปลือง หันมาใช้พลังงานทดแทน บริโภคพลังงานอย่างพอดีและพอเพียง โดยมีเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการใช้งาน และหาทางเลือกในการใช้พลังงานในอนาคต เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวมวล เป็นวิธีการหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงความร้อนเพื่อดึงศักยภาพทางด้านความร้อนมาใช้ประโยชน์ให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถสร้างขึ้นได้ แต่การใช้ชีวมวลเป็นพลังงานนั้นต้องอาศัยกระบวนการที่ซับซ้อนในการแปรรูป และมนุษย์จะต้องลงทุนสร้างวัตถุดิบขึ้นมาทำให้ความสำคัญของชีวมวลลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานในสมัยก่อนการค้นพบน้ำมัน (ปรีชา, 2529) การใช้พลังงานชีวมวลเป็นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยทางอ้อม ประมาณ 1 ใน 7 ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในปัจจุบัน พลังงานชีวมวลนี้ได้มาจากพืชและสัตว์ (ประเสริฐ และคณะ, 2540) แม้จะมีการนำก๊าซชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงอย่างแพร่หลายแต่ยังไม่มีการศึกษาถึงความหนาของชั้นเชื้อเพลิงถึงผลกระทบต่อการจุดติดไฟของก๊าซชีวมวล ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งจึงถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาในงานวิจัยนี้เนื่องมาจากประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมะพร้าวประมาณ 2.43ล้านไร่มีผลผลิตประมาณ 1.63 ล้านตันต่อปี พื้นที่ปลูกที่สำคัญแยกตามภาคต่างๆได้แก่ ภาคใต้ แถบจังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช กระบี่ ตรัง ส่วนภาคกลาง แถบจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สมุทรสงคราม นครปฐม เพชรบุรี ราชบุรี สำหรับภาคตะวันออก ได้แก่ ชลบุรี ระยอง ตราด ฉะเชิงเทรา นอกจากนี้มะพร้าวยังสามารถปลูกได้ทุกสภาพภูมิประเทศปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี ปลูกและเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ตลอดทั้งปีทุกฤดูกาล ทำให้มีวัสดุเหลือใช้จากกะลามะพร้าว ได้แก่ ทางและก้านใบ จั่นหรือก้านทะลาย และกะลาจะมีพ่อค้าคนกลางหรือเกษตรกรที่ทำการปอกเปลือกก่อนส่งสู่โรงงานอุตสาหกรรม โดยทางหรือก้านใบ มีประมาณ 19.59 ล้านตันต่อปี จั่นหรือก้านทะลายมีประมาณ 0.40 ล้านตันต่อปี และกะลามะพร้าวมีประมาณ 1.40 ล้านตันต่อปี (รุ่งโรจน์ พุทธีสกุล, 2553) งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาความหนาของชั้นเชื้อเพลิงเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการจ่ายเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงและพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะเผาไหม้ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความหนาของชั้นเชื้อเพลิงภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นและหาอัตราการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงซึ่งเป็นดัชนีที่สามารถบอกถึงอัตราการให้ความร้อนของเตาชีวมวลแบบไหลขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่ง

กะลามะพร้าว เป็นพืชชีวมวลเหลือใช้จากมะพร้าว ซึ่งมะพร้าว 1 ลูก จะได้ใยร้อยละ 36.2 และกะลาร้อยละ 16 โดยส่วนมากมะพร้าวจะปลูกบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย (ประมาณร้อยละ 80) ซึ่งปกติจะให้ผลผลิตตลอดปีแต่จะให้ผลผลิตมากในช่วงเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม (รุ่งโรจน์ พุทธีสกุล, 2553) ถ่านกะลามะพร้าวที่ใช้ในการทดลองต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ความยาว 8 เซนติเมตร มีรูระบายอากาศตลอดแท่งขนาด 1 เซนติเมตร ส่วนประกอบของแร่ธาตุอาหารสำคัญที่อยู่ในลำต้นปาล์ม ดังแสดงในรูปและตารางที่ 1

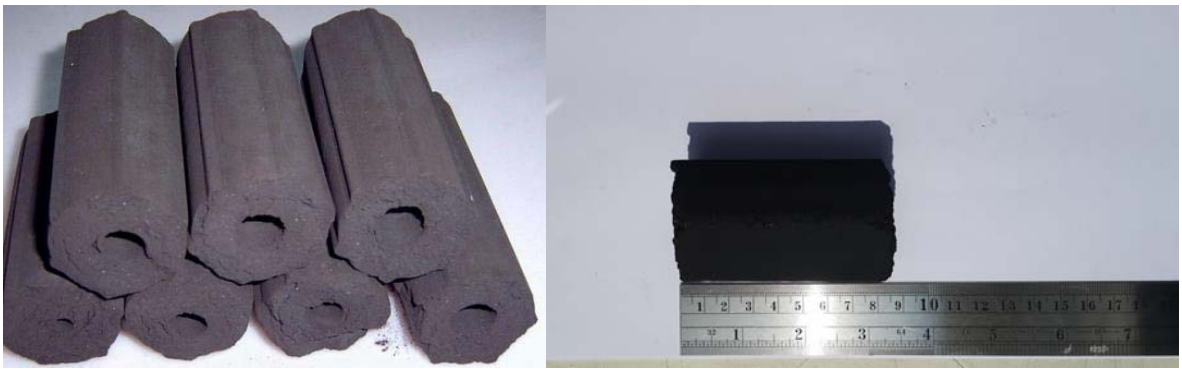


Figure 1 Coconut Shell Charcoal

Table 1 Properties of Coconut Shell Charcoal

Properties	Unit	Coconut Shell Charcoal
	Proximate analysis	
Fixed carbon	Wt%, d.b.	53.0
Ash	Wt%, d.b.	9.0
Volatile	Wt%, d.b.	30.0
Moisture	Wt%, d.b	8.0
	Ultimate analysis	
Carbon	Wt%	60.3
Hydrogen	Wt%	3.5
Nitrogen	Wt%	0.3
Oxygen	Wt%	26.9
Higher Heating Value	MJ/kg	30.46

*Oxygen was calculated by difference (100 – (C + H + N + ash)).

ขั้นตอนการทำงานของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นและอุปกรณ์ประกอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถอธิบายโดย Schematic diagram ในรูปที่2 โดยใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ความสูงของเตาช่วงตะแกรงด้านล่างถึงฝาปิดยาว 600 มิลลิเมตรโดยการทดลองนี้ใช้ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง พร้อมทั้งติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) สำหรับใช้วัดอุณหภูมิของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นในแต่ละโซน โดย Thermocouple ที่ใช้เป็นชนิด K Type มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร และมีความยาว 250 มิลลิเมตรเชื่อมต่อกับเครื่องมือประมวลผลการวัดอุณหภูมิ Data logger รุ่น Center 374 ยกเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นวางบนฐานของเครื่องวัดน้ำหนักแบบดิจิตอล (Load cell) สำหรับใช้วัดน้ำหนักของเตาและเชื้อเพลิงเพื่อหาอัตราการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงโดยวัดจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ไปเทียบกับเวลาและวัดปริมาณลมของพัดลม

เติมอากาศที่จ่ายเข้าห้องเผาไหม้โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการไหลของลมในท่อส่งลม ยี่ห้อ EXTECH รุ่น HD 350 โดยส่งข้อมูลที่ทำการวัดเข้าไปแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ รูปที่ 2 แสดงไดอะกแรมเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

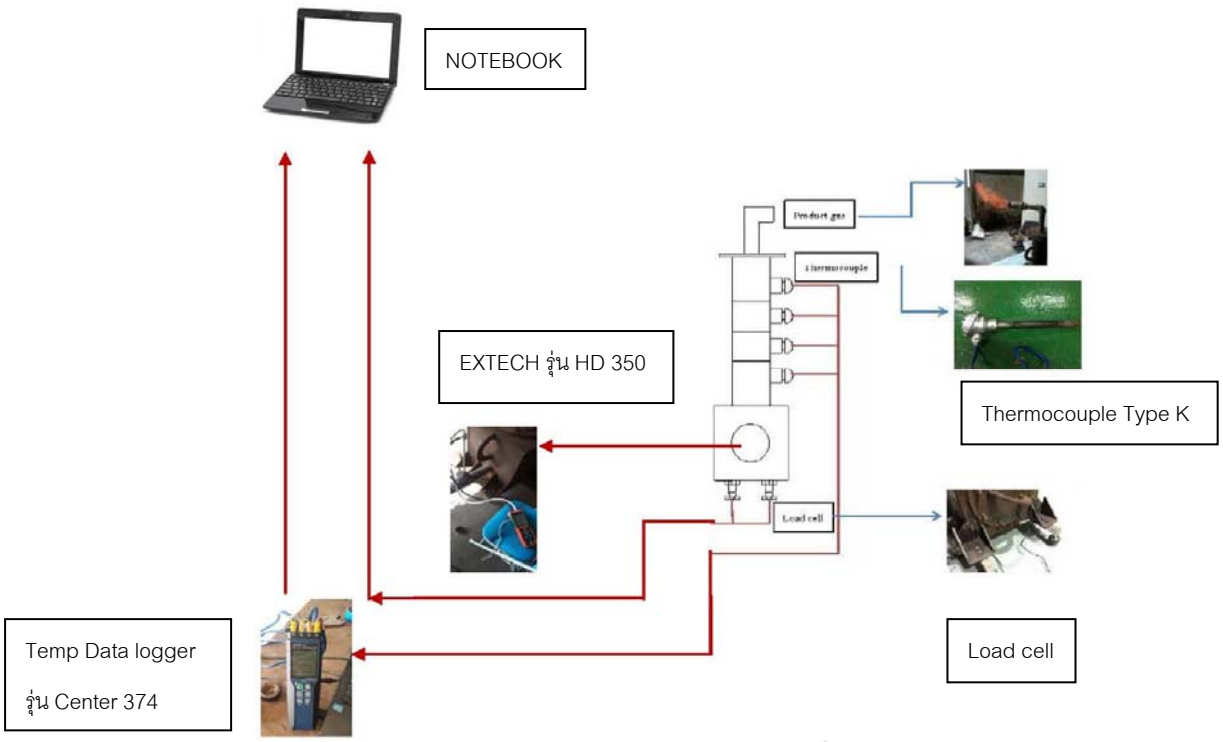


Figure 2 Schematic Diagram of Equipment used in the experiment

ขอบเขตของการทดลองถูกกำหนดโดยความสูงของชั้นเชื้อเพลิงและน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 2 โดยกำหนดให้ตัวอย่าง 1, 2 และ 3 อยู่ภายในเงื่อนไขความสูงของชั้นเชื้อเพลิง คือ 60 cm, 30 cm และ 15 cm ตามลำดับและมีน้ำหนักเชื้อเพลิงขนาด 1 Kg, 2 Kg และ 4 Kg ตามลำดับ เหตุผลที่ใช้ความสูงของชั้นเชื้อเพลิงในการทดลองตามตารางที่ 2 เพราะถ้าใช้ความสูงของชั้นเชื้อเพลิงที่สูงกว่านี้มากอุณหภูมิในการเผาไหม้และเวลาในการทดลองจะมากทำให้เครื่องมือวัดไม่สามารถทนกับอุณหภูมิจากการเผาไหม้ที่สูงมากเกินไปได้จะเกิดความเสียหายกับเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ประกอบ

วิธีการทดลอง

เตรียมเชื้อเพลิงถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งสำหรับใช้ในการทดลองจากนั้นตรวจเช็คสภาพเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นเมื่อตรวจเช็คแล้วจึงติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดสำหรับน้ำหนักและอุณหภูมิโดยในการวัดอุณหภูมิจะทำการวัดทั้งหมด 4 ระดับจากนั้นบรรจุเชื้อเพลิงชีวมวลและทำการจุดเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นโดยใช้หัวเผาด้วยแก๊ส LPG ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิในแต่ละระดับความสูงของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นซึ่งมีทั้งหมด 4 ระดับพร้อมทั้งบันทึกค่าน้ำหนักเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีสูญเสียจากการเผาไหม้ในเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นระหว่างการเผาไหม้ตามช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยการทดลองจะดำเนินไปจนกระทั่งถึงช่วงที่การเผาไหม้ไม่สามารถสร้างสภาวะ Steady-state ได้อีกต่อไป จึงหยุดการทดลองและบันทึกค่า

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ลักษณะของอุณหภูมิภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นขณะเผาไหม้เชื้อเพลิง

หลังจากผ่านกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านกะลาอัดแท่งและทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในช่วงของโซนCombustion และโซนReduction พบว่าช่วงห่างของอุณหภูมิระหว่างโซน Combustion และโซน Reductionจะห่างกันมากที่130 องศาเซลเซียส เมื่อความหนาของชั้นเชื้อเพลิง (Bed depth) น้อย โดยจะเห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดของโซน Combustion ของความหนาชั้นเชื้อเพลิง 60 เซนติเมตรจะมีค่าสูงที่สุดที่ 975 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้จะนานที่สุดที่ 280 นาทีเพราะมีเชื้อเพลิงบรรจุอยู่มากที่สุด ระยะเวลาในการเผาไหม้ของทุกความหนาชั้นเชื้อเพลิงเพื่อไปสู่สภาวะ Steady-state ครั้งแรกของการจุดติดไฟใช้เวลาอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกันประมาณ 30 นาทีแรก โดยอุณหภูมิในโซน Combustion ณ สภาวะ steady-stateครั้งแรกของทุกความหนาชั้นเชื้อเพลิงจะใกล้เคียงกันที่ประมาณ 760 องศาเซลเซียส และจะพบว่าระยะเวลารวมในการจุดติดไฟ ณ สภาวะ steady-state ของความหนาชั้นเชื้อเพลิงขนาด 60 เซนติเมตรจะยาวนานที่สุดที่เวลา 41นาที ดังแสดงในรูปที่ 3

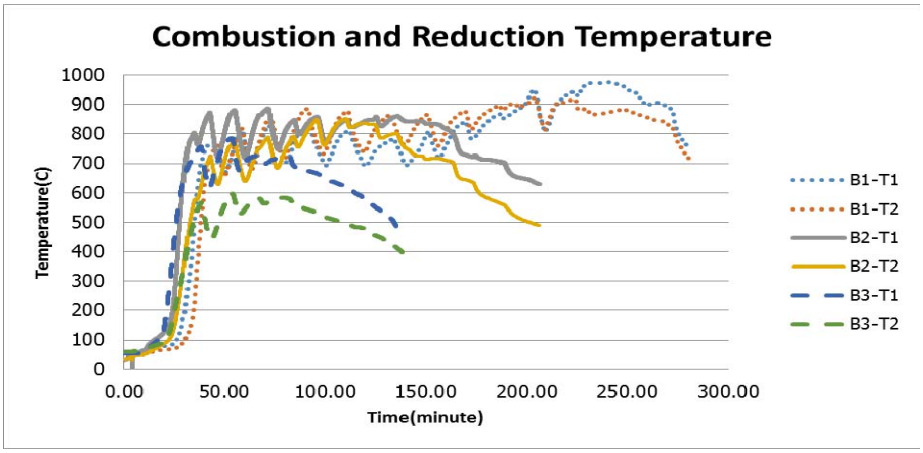


Figure 3 Temperature profile of Combustion and Reduction zone at bed depth : 60, 30 and 15 cm.

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในช่วงของโซน Pyrolysis และโซน Dryingจะพบว่าช่วงห่างของอุณหภูมิระหว่างโซน Pyrolysis และโซน Dryingจะมีระยะห่างที่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส ไม่ว่าความหนาของชั้นเชื้อเพลิง(Bed depth)จะมากหรือน้อย โดยจะเห็นว่าที่ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง 15 เซนติเมตร อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นสู่สภาวะsteady-stateเร็วที่สุดเพื่อพร้อมสำหรับการจุดติดไฟ ณ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสแต่ที่ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง 60 เซนติเมตร อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นสู่สภาวะ steady-stateช้าที่สุดเพื่อพร้อมสำหรับการจุดติดไฟ ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และพบว่าอุณหภูมิสูงสุดของโซน Drying ของความหนาชั้นเชื้อเพลิงที่ 60 เซนติเมตร จะมีค่าสูงที่สุดและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้จะนานที่สุดเพราะมีเชื้อเพลิงบรรจุอยู่มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4

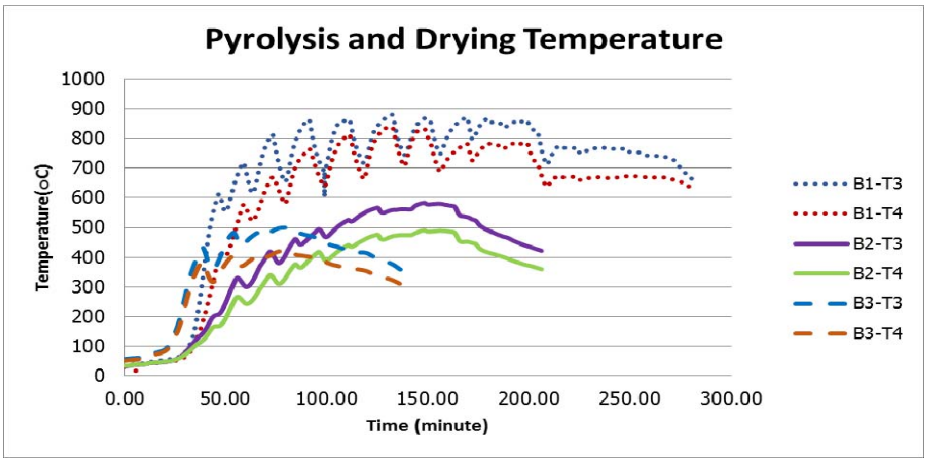


Figure 4 Temperature profile of Pyrolysis and Drying zone at bed depth : 60, 30 and 15 cm.

การสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้ภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้น

เมื่อพิจารณาอัตราการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงพบว่าการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งที่ชั้นความหนาของเชื้อเพลิง 15 เซนติเมตร จะมีอัตราการสูญเสียมวลลดลงอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วกว่าความหนาของชั้นเชื้อเพลิงที่ 30 และ 60 เซนติเมตร เนื่องจากบรรจุเชื้อเพลิงที่น้อยกว่าและมี volatile matter น้อยกว่าในขณะที่ปริมาณอากาศที่เติมเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีค่าคงที่ประมาณ 68 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงตลอดช่วงที่ทำการทดลองจึงทำให้ที่ชั้นความหนาของเชื้อเพลิง 15 เซนติเมตรมีปริมาณอากาศมากกว่าความหนาของชั้นเชื้อเพลิงอื่นๆ เป็นผลให้เกิดการลุกไหม้ได้ดีกว่าเนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้อย่างเพียงพอจึงเกิดภาวการณ์เผาไหม้แบบสมบูรณ์ทำให้อัตราการลดลงของมวลเชื้อเพลิงลดลงได้เร็วกว่าความหนาชั้นเชื้อเพลิงที่ 30 และ 60 เซนติเมตร สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ดิ่งลงมากกว่ากราฟการสูญเสียมวลของตัวอย่างชั้นเชื้อเพลิงที่มีความหนามากกว่า ซึ่งจะไม่ค่อยเห็นความแตกต่างที่เป็นผลมาจากการลดลงของเชื้อเพลิงอันเนื่องมาจากการเผาไหม้เท่าใดนัก เพราะฉะนั้นความหนาของชั้นเชื้อเพลิงน้อยจะเห็นอัตราการลดลงของมวลเชื้อเพลิงชัดเจนที่สุดดังแสดงในรูปที่ 5

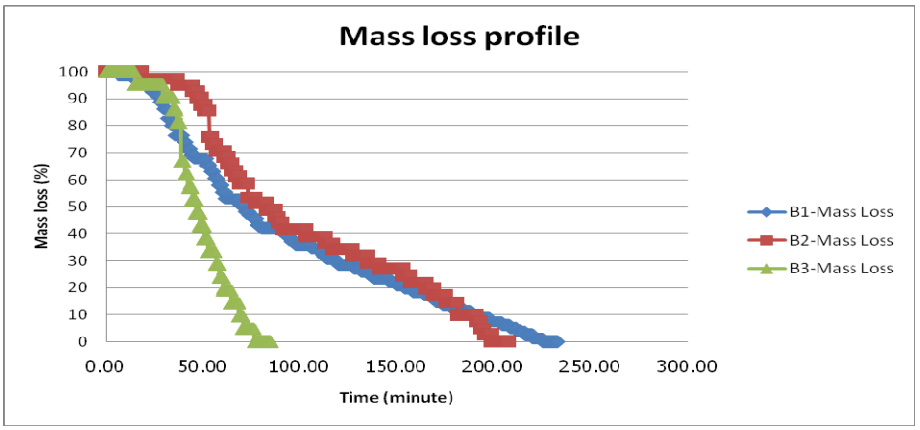


Figure 5 Mass Loss profile of Bed depth at 60 cm, 30 cm and 15 cm.

ความสามารถในการจุดติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาเชื้อเพลิง

จากตารางที่ 3 พบว่าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นเผาไหม้จนถึงช่วงการเกิดสภาวะ Steady-state ชุดแรกที่สามารถจุดติดไฟได้ของทั้ง 3 ตัวอย่างนั้นจะใช้เวลาที่ใกล้เคียงกัน แต่เวลารวมของการจุดติดไฟนั้นจะพบว่าชุดการทดลองที่ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง 60 เซนติเมตรจะสามารถจุดติดไฟได้นานกว่าโดยคิดเป็นเวลาจุดติดไฟที่ 40 นาที และมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดกระบวนการสูงกว่าชุดการทดลองที่ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง 30 และ 15 เซนติเมตรตามลำดับโดยคิดเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 823 องศาเซลเซียส ในขณะที่เมื่อพิจารณาอัตราการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงระหว่างการเผาไหม้นั้นพบว่าชุดการทดลองที่ความหนาของเชื้อเพลิง 15 เซนติเมตร จะมีอัตราการสูญเสียมวลลดลงอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว สำหรับความหนาของชั้นเชื้อเพลิงที่ 30 และ 60 เซนติเมตรจะไม่ค่อยเห็นความแตกต่างที่เป็นผลมาจากการลดลงของเชื้อเพลิงอันเนื่องมาจากการเผาไหม้เท่าใดนัก การจุดติดไฟ ณ สภาวะ Steady-state ระหว่างการทดลองได้แสดงในรูปที่ 6

Table 3 Parameter of experiment

	Bed Depth 3 (15 cm.)	Bed Depth 2 (30 cm.)	Bed Depth 1 (60 cm.)
	Fuel		
Mass of fuel (Kg.)	1.00	2.00	4.00
Dimension (cm.)	Outside diameter 4 cm. Length 8 cm. Inside diameter 1 cm.		
	Gasification		
Start up time (Minute)	38	43	40
Maximum Temperature (°C)	785	888.00	975.00
Total time of ignition (Minute)	8	21	41
Nominal Temperature (°C)	655	791	823
Burnout time (Minute)	138	200	280



Figure 6 Ignition at steady-state

สรุปผลการทดลอง

ผลจากการเผาไม้ถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นได้แสดงให้เห็นว่าความสูงของชั้นเชื้อเพลิงและน้ำหนักของเชื้อเพลิงถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งมีผลต่อระยะเวลาของการจุดติดไฟ ณ สภาวะ Steady-state โดยพบว่ายิ่งมีความสูงของชั้นเชื้อเพลิงที่สูงกว่าจะให้ระยะเวลาของการจุดไฟติดได้นานกว่าดังเช่นที่ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง 60 เซนติเมตรจะให้ระยะเวลาของการจุดติดไฟ 40 นาที และพบว่าที่ความหนาของเชื้อเพลิง 15 เซนติเมตร จะมีอัตราการสูญเสียมวลของเชื้อเพลิงถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งจากการเผาไหม้ลดลงอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้น้อย ดังนั้นหากต้องการนำถ่านกะลามะพร้าวอัดแท่งไปใช้งานเพื่อผลิตก๊าซชีวมวลจะต้องใช้ความหนาของชั้นเชื้อเพลิงที่สูงมากจึงจะให้ช่วงเวลารวมของการจุดติดไฟได้ยาวนานที่สุด และปริมาณอากาศที่เติมเข้าสู่ห้องเผาไหม้ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีต่อทดลองหากปริมาณอากาศที่เติมเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่กำหนดที่ 68 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งน่าจะเป็นตัวแปรที่ทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้แปรเปลี่ยนได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. วิชัย ศิวะโกศิษฐ อาจารย์ที่ปรึกษาที่มอบความรู้ และคอยให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชินธันย์ อารีประเสริฐ ที่คอยให้คำปรึกษาอีกทั้งยังให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดเพื่อนำใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

รุ่งโรจน์ พุทธีสกุล. 2553. **การผลิตถ่านอัดแท่งจากถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเหง้ามันสำปะหลัง**. ปริญญานิพนธ์ กศ.ม (อุตสาหกรรมศึกษา) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ

ประชา เกียรติกระจาย. 2529. **เทคโนโลยีการแปรรูปพลังงานจากไม้**. โครงการเผยแพร่ความรู้ทางวนผลิตภัณฑ์ ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

รัตนะ เลหวนิช. 2550. **การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลงสำหรับกระบวนการอบแห้งปุ๋ย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Daniel Travieso Pedroso. 2013. **Experimental Study of Bottom Feed Updraft Gasifier**. Renewable Energy. 57 (2013): 311-316.

C.Mandl. 2010. **Modeling of an updraft fixed-bed gasifier operated with soft wood pallets**. Fuel. 89 (2010): 3795-3806

P.Plis. 2011. **Theoretical and experimental investigation of biomass gasification process in a fixed bed gasifier**. Energy. 36 (2011): 3838-3845

A.Saravanakumar. 2005. **Operation and modeling of an updraft long-stick wood gasifier**. Energy for sustainable development. 4 (2005): 25-39

Chen, Hung-Cheng, Lin, Jeng-Chyan Muti. 2007. **Development of Modified Updraft Fixed Bed Gasifier Fed by Solid Biomass**. Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation. 39 (2007): 293-298

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงปอกต่อความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยใช้การออกแบบการทดลอง

The Study of Optimum Condition for Turning on Surface Roughness of Aluminum Casting Semi-Solid Grade 6061 Using Experimental Design

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์[1*] ชาตรี หอมเขียว[1] วรรธนพร ชีววุฒิพงศ์[1] และรอมฎอน บูระพา[1]

Surasit Rawangwong[1*], Chatree Homkhiew[1], Watthanaphon Cheewawuttipong[1] and Romadorn Burapa[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะของปัจจัยในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่มีผลต่อความขรุขระผิวโดยใช้เม็ดมีดคาร์ไบด์ ปัจจัยที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยกำหนดความเร็วตัดอยู่ในช่วง 80-120 ม./นาที อัตราป้อน 0.02-0.08 มม./รอบ และความลึกในการตัด 0.20-0.50 มม. ในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ด้วยมีดคาร์ไบด์ ผลการทดลองสามารถกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุดคือ ความเร็วตัด 120 ม./นาที อัตราป้อน 0.02 มม./รอบ และความลึกในการตัด 0.20 มม. จากการทดลองสามารถกำหนดสภาวะการกลึงปอกด้วยสมการ R_a = 1.03671 – 0.08054 cutting speed + 0.31571 feed rate + 0.08363 depth of cut – (0.06504 cutting speed × feed rate) + (0.08704 cutting speed × depth of cut) – (0.05471 feed rate × depth of cut) + (0.03987 cutting speed × feed rate × depth of cut). จากการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่าค่าความขรุขระผิวที่คำนวณได้จากสมการมีค่าแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริง 3.15% ซึ่งถือเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้

ABSTRACT

The purpose of this research was to optimize conditions for turning on surface roughness of aluminum casting semi-solid 6061 by using carbide cutting tools. The experiment was conducted on cutting speed, feed rate and depth of cut, which determines cutting speed in the range of 80-120 m./min, feed rate in the range of 0.02-0.08 mm./rev and depth of cut in the range of 0.20-0.50 mm. For the turning process of aluminum casting semi-solid 6061, the experimental results were the minimum surface roughness with cutting speed of 120 m./min, feed rate 0.02 mm./rev and depth of cut of 0.20 mm. It could determine a cutting condition by means of the equation R_a = 1.03671 – 0.08054 cutting speed + 0.31571 feed rate + 0.08363 depth of cut – (0.06504 cutting speed × feed rate) + (0.08704 cutting speed × depth of cut) – (0.05471 feed rate × depth of cut) + (0.03987 cutting speed × feed rate × depth of cut). Therefore, it was found that the absolute different value was approximately 3.15%, which is in the range of acceptable criteria.

Key Words: design of experiment, turning, aluminum casting semi-solid metal, surface roughness

[*]Corresponding author; e-mail address: sitnong2@yahoo.co.th

[1]หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ (Materials Processing Technology Research Unit)

[1]สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

คำนำ

งานกลึงเป็นกระบวนการแปรรูปชิ้นส่วนอุตสาหกรรมที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง การกลึงปอกผิวเป็นกระบวนการในการลดขนาดความโตของชิ้นงานให้เป็นรูปร่างตามที่ต้องการ โดยให้มีดตัดเคลื่อนที่ตัดเฉือนชิ้นงาน ปัจจัยสำคัญในการกลึงปอกผิวคือ อัตราป้อน ความเร็วตัด ความลึกในการตัด วัสดุมีดกลึง มุมของคมตัดและวัสดุชิ้นงานที่ต้องการตัดเฉือน เป็นต้น ผลที่เกิดขึ้นหลังผ่านการกลึงปอก คือ ขนาดของชิ้นงาน ความขรุขระผิว ลักษณะของเศษกลึง และการสึกหรอของมีดกลึง เป็นต้น จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดเฉือนวัสดุอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการกลึงปอกชิ้นงาน พบว่า (วิมล และธเนศ, 2555) ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการกลึงปอกต่อความขรุขระผิวอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 7075 โดยใช้เครื่องกลึงควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้มีดกลึงคาร์ไบด์ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด ผลการวิจัยพบว่าอัตราป้อนมีผลต่อความขรุขระผิวสูงสุด โดยค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราป้อนต่ำลง หลังจากนั้น (สุรสิทธิ์ และคณะ, 2558) ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวและการสึกหรอของเม็ดมีดในการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356 โดยเครื่องกลึงแอริสัน เอ็ม 300 อาร์ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด ผลการทดลองพบว่าความเร็วตัดมีผลต่อความขรุขระผิวสูงที่สุด โดยค่าความขรุขระผิวมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้อัตราป้อน และความลึกในการตัดต่ำลง

ปัจจุบันอะลูมิเนียมผสมนิยมนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ เป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา ทนทานต่อการเกิดสนิม และการผุกร่อนในสภาพแวดล้อมได้ดี สำหรับอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 เป็นอะลูมิเนียมผสม แมกนีเซียม และซิลิกอนเป็นหลัก มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูง ต้านทานการกัดกร่อน ดังนั้นทำให้อะลูมิเนียมกลุ่มนี้จะนำไปใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนเรือเดินสมุทร ชิ้นส่วนอากาศยาน ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เป็นต้น ปัจจุบันมีการศึกษาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) โดยใช้เทคนิค Gas Induced Semi-Solid ; GISS) (Burapa, 2010 ; เจษฎา, 2554) โดยการพ่นแก๊สไนโตรเจนลงไปในน้ำโลหะที่หลอมเหลวจะทำให้เกิดโครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Globular Grain) โครงสร้างภายในรวมตัวกันแน่นขึ้นและมีโพรงอากาศน้อยลงส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นรวมถึงการตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อนได้ดียิ่งขึ้น อนึ่งการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS นี้ไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมได้นั้นจำเป็นต้องผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการตัดเฉือน เพื่อให้ได้ขนาดและผิวชิ้นงานตามต้องการ อย่างไรก็ตามองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการกลึงปอกผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS ยังมีการวิจัยจำนวนน้อย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยและการเลือกใช้สภาวะการกลึงให้มีความเหมาะสม และเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่มีคุณภาพสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปัจจัยในการกลึงปอกเพื่อให้ได้ค่าความขรุขระผิวจะประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด ซึ่งจะเป็นปัจจัยหลักในการศึกษาวิจัยนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่มีผลต่อความขรุขระผิว และการทำนายค่าความขรุขระผิวของการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061

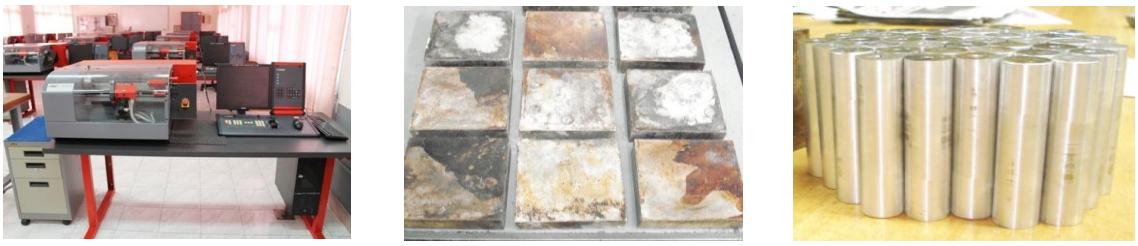
วัสดุ เครื่องจักร และอุปกรณ์

1) เครื่องกลึงที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องกลึงที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ EMCO รุ่น PC Turn 50 (Figure 1 (a)) ที่ความเร็วรอบสูงสุด 2,500 รอบต่อนาที และอัตราป้อนสูงสุด 750 มิลลิเมตรต่อนาที

2) วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอะลูมิเนียม เกรด 6061 ที่ผ่านกระบวนการผลิตโลหะแบบหล่อกึ่งของแข็ง โดยใช้เทคโนโลยี Gas Induce Semi Solid (GISS) ร่วมกับการหล่อแบบบีบอัด (Squeeze Casting) (Burapa, 2010 ; เจษฎา, 2554) โดยเริ่มจากทำการหลอมอะลูมิเนียม เกรด 6061 ภายในเบ้าหลอมชนิดกราไฟต์ด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบขดลวดความต้านทานที่อุณหภูมิ 750 °C เมื่ออะลูมิเนียมหลอมละลายดีแล้ว จึงทำความสะอาดอะลูมิเนียมหลอมเหลวด้วยฟลักซ์ (Flux) แล้วจึงทำการตักอะลูมิเนียมหลอมเหลวจากเตาหลอมในปริมาณ 700 กรัม นำไปเข้าสู่กระบวนการ GISS เพื่อผลิตอะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง ด้วยการพ่นแก๊สไนโตรเจนผ่าน แท่งกราไฟต์ลงไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 660 °C เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นจึงทำการเทหล่ออะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ผลิตได้ลงไปในช่องว่างของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้หล่อขึ้นรูปอยู่ที่ 300 °C แล้วจึงใช้แรงดันในการบีบอัดอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ 66 MPa ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 100 ตัน ทำให้ได้ชิ้นงานดิบของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่มีขนาด 100 x 100 x 25 มิลลิเมตร (Figure 1 (b)) จากนั้นกลึงให้เป็นชิ้นงานสำหรับการทดลองให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร (Figure 1 (c)) ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 (Table 1) และมีค่าความแข็งแรงดึงที่ 225 MPa

3) วัสดุมีดกลึง เป็นเม็ดมีดคาร์ไบด์ ยี่ห้อ Plansee Tizit แบบ DCGT 070204 FN -27 เกรด H10T มีส่วนผสมของ Co 6.0%

4) เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210



(a) (b) (c)

Figure 1 Equipment and tools.

Table 1 Chemical composition of aluminum casting semi-solid 6061.

Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
% Weight	0.57	0.41	0.26	0.06	1.08	0.01	0.02	0.04	Bal.

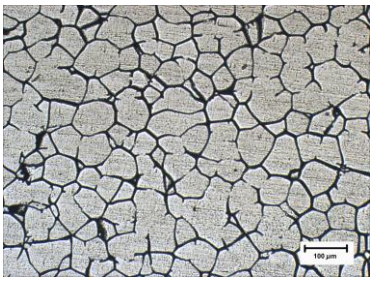


Figure 2 Microstructure of aluminum casting semi-solid 6061.

วิธีดำเนินการ

การวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) หาขนาดสิ่งตัวอย่างการทดลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab 16

2) กำหนดค่าปัจจัยและศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าความขรุขระผิวภายใต้ข้อสมมติฐานว่าปัจจัยหลัก ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด รวมถึงอันตรกิริยา (Interaction) ที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวภายใต้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย 2 ระดับ (2 Factor Factorial Design ; 2^3) (ปราเมศ, 2545; ประไพศรี และคณะ, 2551; Montgomery, 2009) โดยปัจจัยหลักในการทดลองในขั้นตอนนี้มี 2 ระดับ ประกอบด้วย ความเร็วตัด คือ 80 และ 120 เมตร/นาที อัตราป้อน คือ 0.02 และ 0.08 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกในการตัด คือ 0.20 และ 0.50 มิลลิเมตร

3) วิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วยการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลอง จากนั้นวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง และนำผลไปวิเคราะห์ตัวแบบสมการถดถอย (Regression)

4) ตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบสมการถดถอย และเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการพยากรณ์และผลจากการวัดค่าจริง

ผลการวิจัย

1. ขนาดตัวอย่างในแต่ละการทดลอง

จากการทดลองกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยกลึงปอกซ้ำสภาวะ 15 ครั้ง แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 พบว่าได้ขนาดสิ่งตัวอย่างเท่ากับ 3 ตัวอย่าง ในสภาวะการทดลองให้ค่ากำลังแห่งการทดสอบ เท่ากับ 96.68% ซึ่งสูงกว่าค่าระดับความเชื่อมั่นที่ตั้งไว้ 95% ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

2. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อความขรุขระผิวภายใต้การทดลองแบบ 3 ปัจจัย 2 ระดับ

ในการศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวในเบื้องต้น เพื่อลดความผันแปรที่เกิดจากการวัด ผู้วิจัยได้กำหนดการบันทึกผลทดลองโดยการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าที่ได้จะมาจากค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำ 3 ครั้ง การทดลองในขั้นตอนนี้จำนวนการทดลองทั้งหมด 24 การทดลอง โดยทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 16 ผลการทดลอง พบว่าอันตรกิริยาส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยพิจารณาจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 (Table 2, Figure 2, Figure 3) เมื่อพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย และสามปัจจัย พบว่าเส้นอันตรกิริยาไม่ตัดกัน ซึ่งยังไม่สามารถสรุปได้ว่าอันตรกิริยาไม่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว เนื่องจากถ้าอันตรกิริยาไม่มีผลเส้นทั้งสองเส้นจะขนานกัน แต่จากกราฟพบว่าเส้นไม่ขนานกัน แสดงว่าอาจจะมีแนวโน้มที่จะตัดกันที่จุดใดจุดหนึ่ง และในการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนจากการทดลองวัดค่าความขรุขระผิวตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ผลว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 95.87% และค่า Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 94.06% ซึ่งมีความหมายว่าถ้าหากความแปรปรวนในข้อมูลมี 100 ไมโครเมตร แล้วความผันแปร 95.87 ไมโครเมตร สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย ส่วนปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น

จะได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลวัดค่าความขรุขระผิว สามารถอธิบายได้ด้วยความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด แสดงว่าการออกแบบการทดลองนี้ถูกต้องและมีความเหมาะสม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด และอันตรกิริยาของปัจจัยร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย

Table 2 Analysis of variance of surface roughness value and result of regression analysis.

Analysis of Variance for Ra using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Cutting Speed	1	0.15569	0.15569	0.15569	18.60	0.001*
Feed Rate	1	2.39212	2.39212	2.39212	285.71	0.000*
Depth of Cut	1	0.16784	0.16784	0.16784	20.05	0.000*
Cutting Speed × Feed Rate	1	0.10153	0.10153	0.10153	12.13	0.003*
Cutting Speed × Depth of Cut	1	0.18183	0.18183	0.18183	21.72	0.000*
Feed Rate × Depth of Cut	1	0.07183	0.07183	0.07183	8.58	0.010*
Cutting Speed × Feed Rate × Depth of Cut	1	0.03816	0.03816	0.03816	4.56	0.049*
Error	16	0.13396	0.13396	0.00837		
Total	23	3.24296				
S = 0.0915014 R-Sq = 95.87% R-Sq (adj) = 94.06%						
Regression Analysis: Ra versus Cutting Speed, Feed Rate, Depth of Cut						
The regression equation is						
Ra = 1.03671 – 0.08054 cutting speed + 0.31571 feed rate + 0.08363 depth of cut – (0.06504 cutting speed × feed rate) + (0.08704 cutting speed × depth of cut) – (0.05471 feed rate × depth of cut) + (0.03987 cutting speed × feed rate × depth of cut)						
Predictor	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	1.03671	0.01868	55.51	0.000*		
Cutting Speed	-0.08054	0.01868	-4.31	0.001*		
Feed Rate	0.31571	0.01868	16.90	0.000*		
Depth of Cut	0.08363	0.01868	4.48	0.000*		
Cutting Speed × Feed Rate	-0.06504	0.01868	-3.48	0.003*		
Cutting Speed × Depth of Cut	0.08704	0.01868	4.66	0.000*		
Feed Rate × Depth of Cut	-0.05471	0.01868	-2.93	0.010*		
Cutting Speed × Feed Rate × Depth of Cut	0.03987	0.01868	2.13	0.049*		
S = 0.0915014 R-Sq = 95.87 % R-Sq(adj) = 94.06 %						

**P*-value less than 0.05 is considered significant.

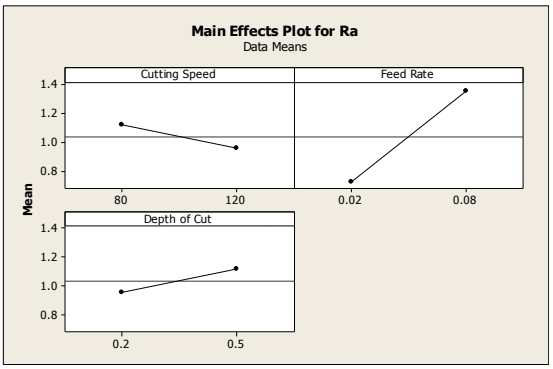


Figure 2 The plot of main effects on surface roughness by changing the level of the main factors.

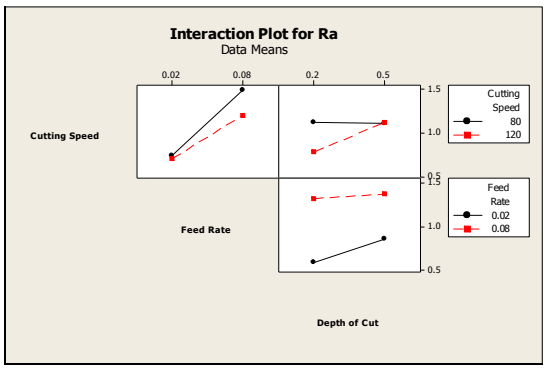


Figure 3 The plot of interaction effects on surface roughness by changing the level of the main factors.

3. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือจึงนำข้อมูลผลการวัดค่าความขรุขระผิวมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 16 (Table 2) และผลการวิเคราะห์สมการถดถอย พบว่าเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวกับตัวแปรอิสระ มีปัจจัยที่นำมาพยากรณ์ได้ คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด และอันตรกิริยาของความเร็วตัดกับอัตราป้อน ความเร็วตัดกับความลึกในการตัด อัตราป้อนกับความลึกในการตัด และความเร็วตัดกับอัตราป้อนและความลึกในการตัด เนื่องจากมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Actual variable ได้ดังสมการที่ 1 คือ

$$R_a = 1.03671 - 0.08054\ \text{cutting speed} + 0.31571\ \text{feed rate} + 0.08363\ \text{depth of cut} - (0.06504\ \text{cutting speed} \times \text{feed rate}) + (0.08704\ \text{cutting speed} \times \text{depth of cut}) - (0.05471\ \text{feed rate} \times \text{depth of cut}) + (0.03987\ \text{cutting speed} \times \text{feed rate} \times \text{depth of cut}) \quad (1)$$

การวิเคราะห์การถดถอยของความขรุขระผิวของปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาที่มีผลต่อความขรุขระผิว โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยนำมาวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ผลจากการวิเคราะห์การถดถอย (Table 3) สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและอันตรกิริยาของปัจจัยร่วมในรูปของสมการเชิงเส้นของค่าความขรุขระผิว โดยสามารถแสดงสมการถดถอยแบบ Coded variable ได้ดังสมการที่ 2 คือ

$$R_a = 0.9788 - 0.0088\ \text{cutting speed} + 25.6190\ \text{feed rate} - 1.7360\ \text{depth of cut} - (0.1084\ \text{cutting speed} \times \text{feed rate}) + (0.0290\ \text{cutting speed} \times \text{depth of cut}) - (12.1574\ \text{feed rate} \times \text{depth of cut}) \quad (2)$$

4. การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงปอก

การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 จะใช้ Response optimizer ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (Ra) มีค่าน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิว (Table 4, Figure 4) เมื่อพิจารณาจะพบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดในการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 โดยคำนวณจาก Response optimizer ในโปรแกรม Minitab 16 คือความเร็วตัด 120 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งระดับปัจจัยที่ดีที่สุดนี้จะนำไปใช้ในการทดลองเพื่อยืนยันสมการถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

Table 3 Result of regression analysis.

Response Surface Regression: Ra versus Cutting Speed, Feed Rate, Depth of Cut				
General Regression Analysis:				
Regression Equation for Ra Ra = 0.9788 – 0.0088 cutting speed + 25.6190 feed rate – 1.7360 depth of cut – (0.1084 cutting speed × feed rate) + (0.0290 cutting speed × depth of cut) – (12.1574 feed rate × depth of cut)				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.9788	0.32792	2.985	0.008*
Cutting Speed	-0.0088	0.00312	-2.809	0.012*
Feed Rate	25.6190	3.83916	6.673	0.000*
Depth of Cut	-1.7360	0.73455	-2.363	0.030*
Cutting Speed * Feed Rate	-0.1084	0.03423	-3.167	0.006*
Cutting Speed * Depth of Cut	0.0290	0.00685	4.238	0.001*
Feed Rate * Depth of Cut	-12.1574	4.56429	-2.664	0.016*
S = 0.100622 R-Sq = 94.69% R-Sq (adj) = 92.82%				

**P*-value less than 0.05 is considered significant.

Table 4 Finding the right level factors of turning.

Response Optimization						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Ra	Minimum	0.075	0.075	0.16	1	1
Global Solution						
Cutting Speed = 120 Feed Rate = 0.02 Depth of Cut = 0.20						
Predicted Responses						
Ra = 0.480125 , Desirability = 0.905197						
Composite Desirability = 0.905197						

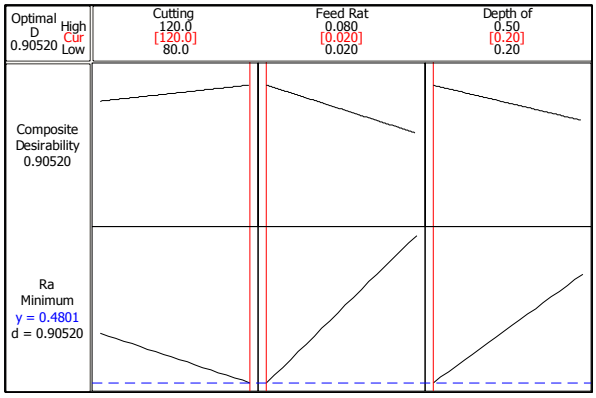


Figure 4 Level factors that a surface roughness suitable work surface.

5. การทดสอบยืนยันผลการทดลอง

การทดลองยืนยันผลเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลสรุปของค่าปัจจัยตามปัจจัยที่กำหนดไว้ คือ ความเร็วตัด 120 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการตัด 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันสมการถดถอย พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิวในการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 เท่ากับ 0.541 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยการแทนค่า

ระดับปัจจัยที่เหมาะสมลงในสมการถดถอย เท่ากับ 0.546 ไมโครเมตร เมื่อทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันสมการถดถอย พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิวในการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่ได้จากการทดลองยืนยันผลไม่มีความแตกต่างกันของค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการแทนค่าของระดับปัจจัยที่เหมาะสมในสมการความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาใช้ในการพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ได้จริง และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้จากสมการถดถอยเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ จากการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยมีค่าเท่ากับ 3.15 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าสมการถดถอยที่ได้จากผลการทดลองสามารถนำมาใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ได้

สรุป

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ในการกลึงปอกด้วยเครื่องกลึง ซีเอ็นซี และวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวเพื่อใช้ในการสร้างสมการถดถอยสำหรับการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 สรุปผลได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก พบว่าปัจจัยหลัก คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.001 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05

2. ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอันตรกิริยา พบว่าปัจจัยที่เป็นอันตรกิริยา คือ ความเร็วตัดกับอัตราป้อน ความเร็วตัดกับความลึกในการตัด อัตราป้อนกับความลึกในการตัด และความเร็วตัดกับอัตราป้อนและความลึกในการตัด มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.003 0.000 0.010 และ 0.049 ซึ่งน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05

3. ผลการวิเคราะห์สมการถดถอย พบว่าเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ของความขรุขระผิวกับตัวแปรอิสระ มีปัจจัยที่นำมาพยากรณ์ได้ คือ ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัด และอันตรกิริยาของความเร็วตัดกับอัตราป้อน ความเร็วตัดกับความลึกในการตัด อัตราป้อนกับความลึกในการตัด และความเร็วตัดกับอัตราป้อนและความลึกในการตัด เนื่องจากมีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Actual variable ได้สมการที่ 1 คือ $Ra = 1.03671 - 0.08054$ *cutting speed* $+ 0.31571$ *feed rate* $+ 0.08363$ *depth of cut* $- (0.06504$ *cutting speed* $\times$ *feed rate)* $+ (0.08704$ *cutting speed* $\times$ *depth of cut)* $- (0.05471$ *feed rate* $\times$ *depth of cut)* $+ (0.03987$ *cutting speed* $\times$ *feed rate* $\times$ *depth of cut)*

4. ระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวสามารถหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 คือ ความเร็วตัด 120 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการตัด 0.20 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่า Response optimization ในโปรแกรม Minitab 16 ได้ทำการเลือกระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ส่งผลให้มีค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุด

5. การทดลองเพื่อยืนยันผลเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลสรุปของค่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วตัด 120 เมตร/นาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการตัด 0.20 มิลลิเมตร ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันสมการถดถอย พบว่ามีค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิวในการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 มีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยการแทนค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมลงในสมการถดถอย เมื่อทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันสมการถดถอย พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความขรุขระผิวในการกลึงปอกชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6061 ที่ได้จากการทดลองยืนยันผลไม่มีความแตกต่างกันของค่าความขรุขระผิวที่ได้ และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวได้จากสมการถดถอยเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ จากการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยมีค่าเท่ากับ 3.15 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปี 2559 และขอขอบคุณ บริษัท กิสโค จำกัด สำหรับวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

วิมล บุญรอด และธเนศ รัตนวิไล. 2555. อิทธิพลของปัจจัยในการกลึงปอกต่อความขรุขระของผิวอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง. **วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**. ปีที่ 23 ฉบับที่ 4. หน้า 73-77.

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ วรรธนพร ชีววุฒิพงศ์ ชาตรี หอมเขียว และรอมฎอน บูระพา. 2558. อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวและการสึกหรอของเม็ดมีดในการกลึงปอกอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 356. **การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ**. 25-27 มีนาคม. หน้า 134-139.

R. Burapa, S. Janudom, T. Chucheep, R. Canyook and J. Wannasin. 2010. Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process. Trans. **Nonferrous Met. Soc.** China 20. 857-861.

เจษฎา วรรณสินธุ์. 2554. เทคนิคการหล่ออลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. **สมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย**. หน้า 48-53.

ปราเมศ ชุติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด. กรุงเทพฯ.

Montgomery, D.C. 2009. **Design and Analysis of Experiments.** 7th edition. John Wiley & Sons Inc.

อิทธิพลของประเภทคาร์บอนและเวลาการดูดซับโลหะต่อสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/C สำหรับปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันของเอทานอลในด่าง

Influence of carbon support type and metal adsorption time on performance of Pd/C catalyst for ethanol electro-oxidation in alkaline

ประภาพรรณ ไลวรรณ์[1] อภิชัย เทอดเทียนวงษ์[2*] และ สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์[1]

Prapapan Laiwan[1], Apichai Therdthianwong[2*] and Supaporn Therdthianwong [1]

บทคัดย่อ

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาพาลาเดียม (Pd) บนตัวรองรับคาร์บอน โดยใช้วิธีการปกป้องโซลด้วยพอลิไวนิลแอลกอออส์(polyvinyl alcohol protection method,PVA) ได้ทำการกำหนดตัวแปรที่ศึกษา คือชนิดของคาร์บอนที่ใช้เป็นตัวรองรับ(คาร์บอนวัลแคนC และ คาร์บอนนาโนทิวป์,CNT) และเวลาที่ใช้ในการดูดซับของโลหะบนตัวรองรับ (1 และ 24 ชั่วโมง) จากผลการทดลองโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) พบว่า ตัวรองรับคาร์บอนนาโนทิวป์ให้สมรรถนะการทำงานของ Pd/C ที่ดีกว่าตัวรองรับคาร์บอนวัลแคน 2-3 เท่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/CNT ที่ใช้เวลาในการดูดซับโลหะ 1 ชั่วโมง สามารถให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงที่สุด 561.7 mA/mg_{Pd} ที่สภาวะความเข้มข้น1M EtOH ใน 1M KOH และในการทดสอบด้วยเทคนิคโครโนแอมเปอโรเมทรี (CA) พบว่า Pd/CNT ที่ใช้เวลาในการดูดซับของโลหะลงบนตัวรองรับ1 ชั่วโมง ยังให้เสถียรภาพในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เวลาในการดูดซับ24 ชั่วโมง จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งจากภาพถ่ายพบว่า ขนาดของกลุ่มอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาในการดูดซับอนุภาคเพิ่มขึ้นส่งผลให้ สมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/CNT ที่เตรียมโดยใช้เวลาในการดูดซับ24 ชั่วโมงมีค่าลดลง

ABSTRACT

The effects of catalyst preparation parameters on the performance of Pd/C prepared by polyvinyl alcohol (PVA) protection method were investigated. The selected parameters were carbon support type (Vulcan and carbon nanotube) and metal adsorption time (1 and 24 h). From cyclic voltammetry (CV) results, Pd supported on carbon nanotube provided 2-3 times higher current density than that supported on Vulcan. For the effect of metal adsorption time, the Pd/CNT prepared by using 1 h adsorption time gave the highest current density at 561.7 mA/mg_{Pd} in solution of 1M Ethanol with 1M KOH. In addition, chronoamperometry (CA) results indicated that the Pd/CNT prepared by using 1 h adsorption time was the most stable catalyst. It was observed from Transmission Electron Microscope (TEM) image that the size of the particle cluster increased with increasing metal adsorption time, causing the performance reduction of the Pd/CNT prepared by 24 h metal adsorption time.

Key Words: electro ethanol oxidation, Pd electrode, supporting carbon, adsorption time

* Corresponding author; e-mail address: **apichai.the@kmutt.ac.th**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กทม.

[1]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT),

[2] ศูนย์วิจัยและวิศวกรรมเซลล์เชื้อเพลิงและไฮโดรเจน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[2]Fuel Cells and Hydrogen Research and Engineering Center, KMUTT

คำนำ

ปัจจุบันมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก ทำให้พลังงานจากปิโตรเลียมลดลงอย่างรวดเร็ว เราจึงต้องทำการศึกษาหาเทคโนโลยีใหม่ๆที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงขึ้น เทคโนโลยีหนึ่งที่ทั่วโลกให้ความสนใจคือ เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำการเปลี่ยนพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยปัจจุบันแนวโน้มในการใช้เชื้อเพลิงจำพวกแอลกอฮอล เช่น เมทานอล เอทานอล กลีเซอรอล และ เอทิลีนไกลคอล ในเซลล์เชื้อเพลิงมีเพิ่มขึ้น เพราะเชื้อเพลิงเหล่านี้จัดเป็นพลังงานแบบทดแทนได้ สำหรับเชื้อเพลิงเอทานอลมีข้อดี คือ มีความเป็นพิษต่ำ เมื่อเทียบกับเมทานอล และเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ง่ายจากพืชผลทางการเกษตร นอกจากนี้ในการใช้งานกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนแอลกอฮอล์โดยตรง (Direct Alcohol Fuel Cell) พบว่า เอทานอลจะเกิดการไหลข้ามผ่านเมมเบรนได้ต่ำกว่าเมทานอล สิ่งนี้ถือเป็นข้อได้เปรียบ เพราะการไหลข้ามของเชื้อเพลิงจะก่อให้เกิดผลเสียต่อขั้วแคโทดโดยทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าต่ำลง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนเอทานอลโดยตรง ภายใต้สภาวะด่าง ที่มีข้อดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลในสภาวะกรด ได้แก่การศึกษาของ A. Brouzgou *et al*., 2013 ซึ่งพบว่า ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen reduction reaction: ORR) ภายใต้สภาวะด่างเกิดได้เร็วกว่า ส่งผลให้สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาไม่สูงมาก เช่น Nickle(Ni) และ Silver(Ag) ได้ โดยโลหะเหล่านี้มีค่าการกัดกร่อนต่ำ ปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถภาพของเซลล์เชื้อเพลิง คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ใช้เตรียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยเฉพาะที่ด้านแอโนด โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอลโดยตรงแบบด่างมีหลายชนิด เช่น แพลทินัม (Pt) , แพลลาเดียม (Pd) และ ทอง(Au) สำหรับงานวิจัยในช่วงเริ่มต้นนั้นใช้ Pt เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ต่อมาได้ปรับเลี่ยนไปใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เช่น Pd ซึ่งในกลุ่มวิจัยของ Xu *et al*. (2007) ได้เปรียบเทียบการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา ระหว่าง Pt กับ Pd บนคาร์บอน Vulcan และ คาร์บอน microspheres ในการกระตุ้นปฏิกิริยาเอทานอล-ออกซิเดชัน (Ethanol oxidation reaction:EOR) โดยพบว่า ค่าความต่างศักย์ของเอทานอลออกซิเดชัน ของ Pd มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า Pt และค่าความหนาแน่นกระแสของ Pd สูงกว่า Pt ในสภาวะด่าง

ในการวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อสมรรถนะของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd บนตัวรองรับคาร์บอน สำหรับการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชัน ของ เอทานอลในตัวกลางด่าง โดยตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือตัวรองรับคาร์บอน 2 ชนิด คือ วัลแคน (C) และ นาโนทิวป์ (CNT) และ ศึกษาเวลาที่ใช้ในการดูดซับโลหะลงบนตัวรองรับคาร์บอน

อุปกรณ์และวิธีการ

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/C และ Pd/CNT โดยใช้สารตั้งต้น $Pd(NO_3)_2 \cdot xH_2O$ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีปกป้องโซลด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และให้มีปริมาณโลหะ 10% โดยน้ำหนักบนตัวรองรับคาร์บอน 2 ประเภท คือ วัลแคน (C) และ นาโนทิวส์ (CNT) โดยมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการดูดซับโลหะลงบนตัวรองรับ ที่ 1 และ 24 ชั่วโมง

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) โดยเครื่อง JEOL รุ่น JEM 2010 ศักย์ไฟฟ้า 200 keV

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry,CV) โดยกำหนดช่วงศักย์ไฟฟ้าระหว่าง - 1.0 – 0.8 V vs. Hg/HgO อัตราการสแกนมีค่าเท่ากับ 50 mV/s และการวิเคราะห์ความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคโครโนแอมเปอโรเมทรี (Chronoamperometry) กำหนดให้มีการทดสอบที่ค่าความต่างศักย์ -0.2 V vs. Hg/HgO เป็นเวลา 7,200 s (2 ชั่วโมง) โดยใช้เครื่อง potentionstat (SI 1287, Solartron)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค TEM ในการตรวจสอบขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของโลหะ Pd บนตัวรองรับคาร์บอน พบว่าทั้ง Pd/C และ Pd/CNT ให้คุณลักษณะทางกายภาพที่คล้ายคลึงกัน คือ อนุภาคของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา Pd เกิดการจับเกาะกลุ่มกันเป็นไข่ปลา โดยการเกาะกลุ่มกันของ Pd/C (Figure 1A) มีลักษณะการจับตัวกันอย่างหนาแน่น ในส่วนของ Pd/CNT (Figure 1B) มีการเกาะกลุ่มกันแบบหลวมกว่า เนื่องจากยังสามารถเห็นลักษณะของวงกลมเกาะกลุ่มกันเป็นแพ

เมื่อทำการพิจารณาผลกระทบของเวลาที่ใช้ในการดูดซับของโลหะลงบนตัวรองรับ ที่ 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ในกรณีของ Pd/CNT พบว่า การใช้เวลาในการดูดซับโลหะลงบนตัวรองรับ 24 ชั่วโมง ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยารวมตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่ขึ้น และมีการกระจายตัวของก ลุ่มก้อนตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยลง เมื่อเทียบกับการใช้เวลาในการดูดซับโลหะ 1 ชั่วโมง (ดังแสดงขนาดเฉลี่ยนของอนุภาคใน Table 1) และจากผลการวัดขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/CNT ที่เวลาในการดูดซับ 1 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.3 ± 1.5 nm

จากการเกิดรูปแบบการจับกลุ่มของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไข่ปลามีสาเหตุจากในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีสภาพความเป็นกรดสูงมาก อาจทำให้ประจุไม่ผลักกันมากพอที่จะทำให้โซลแยกตัวกัน ซึ่งการจับกลุ่มก้อนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับคาร์บอนนี้ จะส่งผลต่อพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ดังจะได้ทำการวิเคราะห์ในหัวข้อคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้า

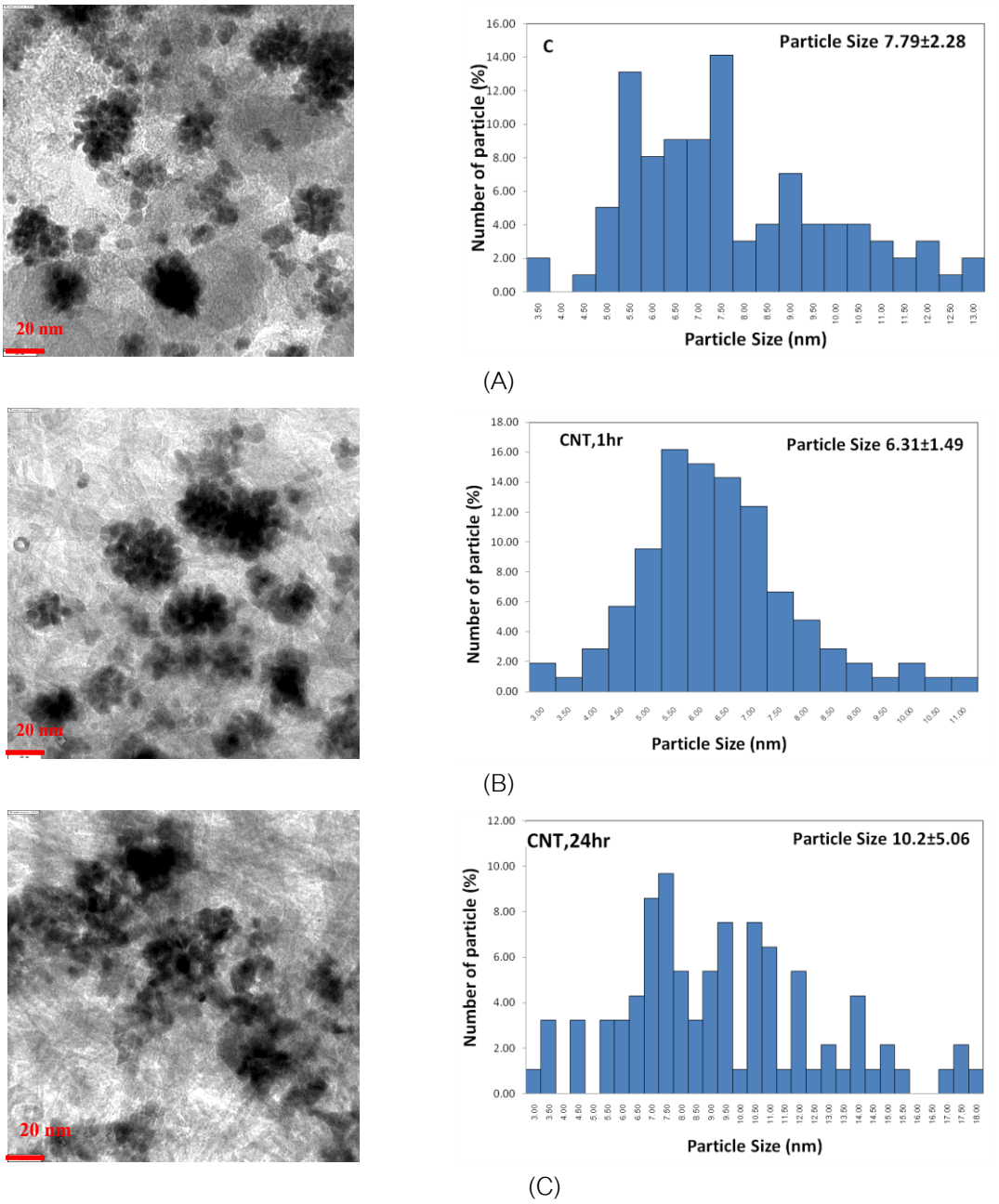


Figure 1 Particle size and distribution of the Pd catalysts ; (A) Vulcan supported, (B) Carbon nanotube supported with adsorption time 1 hr and (C) Carbon nanotube supported with adsorption time 24 hr

Table 1 Particle sizes of Pd catalysts

Catalysts	Particle size (nm)	Active surface area (m^2g^{-1})*
Pd/C	7.79 ± 2.28	14.79
Pd/CNT at adsorption time 1 hr	6.31 ± 1.49	20.62
Pd/CNT at adsorption time 24 hr	10.2 ± 5.06	11.69

* Using the monolayer PdO reduction charge of 405 μC cm^{-2}

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้า

กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd ในสภาวะด่าง เป็นดังนี้ในกรณีที่ทำการสแกนไปข้างหน้า (forward scan) ที่ช่วงความต่างศักย์ -0.9 ถึง -0.7 V vs. Hg/HgO นั้น มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนที่ดูดซึมและดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Eq.(1))

$$Pd — H_{abs/ads} + OH^- \rightarrow Pd — H_2O + e^- \quad (1)$$

ในช่วงความต่างศักย์ -0.75 ถึง -0.25V vs. Hg/HgO จะเกิดปรากฏการณ์การดูดซับของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (Pd) ดังแสดงในสมการที่ (2) ซึ่งเริ่มต้นในช่วงที่มีค่าความต่างศักย์ติดลบมากๆ นอกจากนี้ยังมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Pd ตาม Eq.(3) และ (4) โดยอาจมีบางส่วนที่เกิดขึ้นซ้อนทับกับช่วงของการคายไฮโดรเจนที่อยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$Pd + OH^- \leftrightarrow Pd — OH_{ads} + e^- \quad (2)$$

$$Pd — OH_{ads} + OH^- \leftrightarrow Pd — O + H_2O + e^- \quad (3)$$

$$Pd — OH_{ads} + Pd — OH_{ads} \leftrightarrow Pd — O + H_2O \quad (4)$$

และที่ความต่างศักย์มากกว่า -0.25 V vs. Hg/HgO เกิดการสร้างชั้น Pd (II) oxide บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ถึงแม้ว่ากลไกการเกิดออกซิเดชันจะเห็นได้ไม่เด่นชัด แต่เป็นที่ยอมรับกันในวงกว้างว่า OH^- จะถูกดูดซับทางเคมีเป็นขั้นแรกของการเกิดออกไซด์บนพื้นผิวโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และ ที่ค่าความต่างศักย์เพิ่มสูงขึ้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดเป็นโลหะออกไซด์เพิ่มมากขึ้น (Z.X. Liang *et al*, 2009) ในสภาวะการสแกนย้อนกลับ (backward scan) ที่ช่วงความต่างศักย์มีค่า -0.3 V vs. Hg/HgO ปฏิกิริยาการรีดักชันของ Pd (II) oxide จึงเกิดขึ้นตาม Eq.(5)

$$Pd — O + H_2O + 2e^- \leftrightarrow Pd + 2OH^- \quad (5)$$

- อิทธิพลของตัวรองรับคาร์บอนสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Pd

ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวรองรับคาร์บอนสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา Pd ต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าเคมีในการเกิดออกซิเดชั่นของเชื้อเพลิงเอทานอลในสารละลาย KOH โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมแมทรี จากผลการทดสอบเบื้องต้นของ ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/C และ Pd/CNT ในสารละลาย 1M KOH ณ จุดที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.3 V พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd บนตัวรองรับ CNT มีค่าพื้นที่ผิวว่องไวสูงสุดและมีค่าที่มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับวัลแคน ถึง 1.4 เท่า ดังแสดงใน Figure 2(A),Table 1 ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า Pd/CNT มีค่า พื้นที่ผิวว่องไวมากกว่า Pd/C

สำหรับผลการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเอทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยา Pd ในสารละลายผสมระหว่าง 1M KOH และ 1M EtOH พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของเอทานอลมีค่าสูงสุดที่ค่าความต่างศักย์ -0.14 V ในการสแกนไปข้างหน้า และที่ตำแหน่ง -0.33 V ในการสแกนย้อนกลับ ซึ่งกลไกในการเกิดปฏิกิริยา สามารถแสดงเป็นสมการปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$Pd + CH_3CH_2OH \leftrightarrow Pd — (CH_3CH_2OH)_{ads} \quad (6)$$

$$Pd — (CH_3CH_2OH)_{ads} + 3OH^- \rightarrow Pd — (CH_3)_{ads} + 3H_2O + 3e^- \quad (7)$$

จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/CNT ให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุด เท่ากับ 561.7 mA/mg_{Pd} ซึ่งมีค่ามากกว่า Pd/C ประมาณ 2.4 เท่า ในการสแกนไปข้างหน้า และ 1.7 เท่า ในการสแกนย้อนกลับ ซึ่งแสดงให้

เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/CNT มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันของเอทานอลมากกว่า Pd/C ซึ่งมีผลสอดคล้องกับข้อมูล TEM

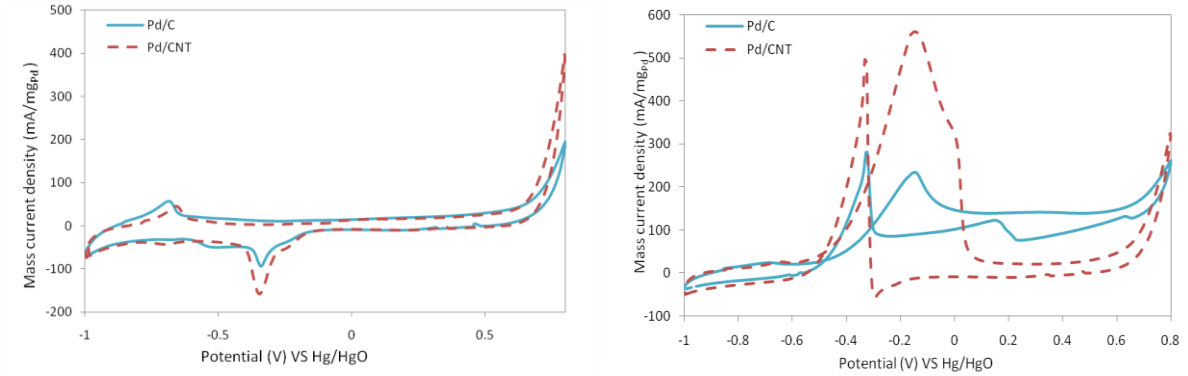


Figure 2 Cyclic Voltamograms (CVs) of Pd/C and Pd/CNT, in 1M KOH (A) containing 1M EtOH (B).

- อิทธิพลของเวลาในการดูดซับโลหะลงบนตัวรองรับ

ในการศึกษาอิทธิพลของเวลาในการดูดซับโลหะ (Pd) ลงบนตัวรองรับ ที่ได้ทำการเลือกใช้ตัวรองรับคาร์บอนนาโนทิวป์ (CNT) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับนี้สามารถให้ค่าการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับคาร์บอนวัลแคน (C) จากการทดสอบเบื้องต้นในสารละลาย 1M KOH (Figure 3 (A)) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการใช้เวลาในการดูดซับของโลหะลงบนตัวรองรับ 1 ชั่วโมง สามารถให้พื้นที่ใต้กราฟของค่ากระแสไฟฟ้ารีดักชัน(ที่ความต่างศักย์ -0.3 V) มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากการใช้เวลาดูดซับ 24 ชั่วโมง ถึง 1.8 เท่า และเมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันของเอทานอลในสารละลายผสมระหว่าง 1M KOH และ 1M EtOH (Figure 3 (B)) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/CNT ที่เตรียมได้จากการใช้เวลาดูดซับโลหะลงบนตัวรองรับ 1 ชั่วโมง ให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงที่สุด เนื่องจากการใช้เวลาในการดูดซับโลหะ Pd ลงบนตัวรองรับ CNT เป็นเวลานาน อาจทำให้ Pd ที่ถูกดูดซับลงบนตัวรองรับเกิดซ้อนทับกันและรวมตัวเป็นกลุ่มที่ใหญ่ขึ้น ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ คิดต่อน้ำหนักพาลาเดียม (Pd) มีค่าลดลง ส่งผลให้ปริมาณพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลง

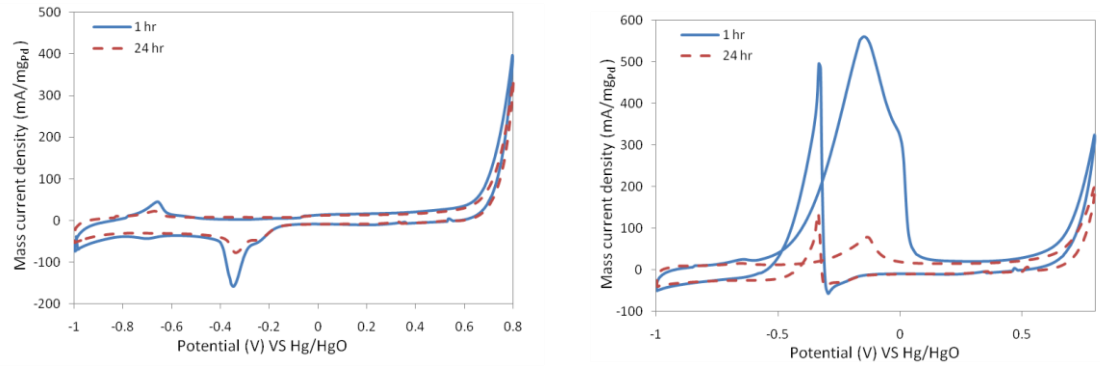


Figure 3 Cyclic Voltamograms (CVs) of Pd/CNT at adsorption time 1 and 24 hrs, in 1M KOH (A) containing 1M Ethanol (B).

ความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

จากการทดสอบความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd/C และ Pd/CNT ด้วยเทคนิคโครโนแอมเปอโรเมทรีที่ศักย์ไฟฟ้า -0.2 V (Figure 4) จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสในช่วงเริ่มต้นจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลจากความเป็นพิษของสารมัธยันตร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันของเอทานอล (S. Yongprapat *et al*,2012) หลังจากนั้นค่าความหนาแน่นกระแสจะลดลงและเข้าสู่สภาวะคงตัวเทียม (pseudo-steady state) เมื่อพิจารณาความหนาแน่นกระแสสุดท้าย (final current density) และอัตรการเสื่อม (decay rate) ดังแสดงใน Table. 2 พบว่า Pd/CNT มีความเสถียรมากกว่า Pd/C โดยมีความหนาแน่นสุดท้ายเท่ากับ 5.05 mA/mg_{Pd}

Table 2 Final current density and decay rate

Catalysts	Final current density (mA/mg_{Pd})	Decay rate ($10^{-3}\%\cdot s^{-1}$)
Pd/C	1.51	12.07
Pd/CNT at adsorption time 1 hr	5.05	11.89

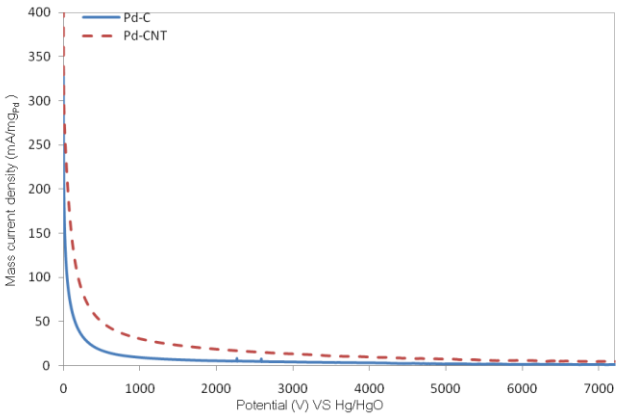


Figure 4 Chronoamperometry (CA) of Pd/C , Pd/CNT at adsorption time 1 hr and Pd/CNT at adsorption time 24 hr , in 1M KOH (A) containing 1M Ethanol (B) at -0.2 V 2 hr.

สรุป

ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีปกป้องโซลด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยใช้ตัวรองรับคาร์บอนที่แตกต่างกัน และ ใช้เวลาในการดูดซับของโลหะ บนตัวรองรับต่างกัน จากการทดสอบลักษณะทางเคมีไฟฟ้าสำหรับปฏิกิริยาอิเล็กโทรออกซิเดชันของเอทานอลในตัวกลางด่าง พบว่าตัวรองรับที่เหมาะสมสำหรับ Pd คือ คาร์บอนนาโนนิวป์ และ เวลาในการดูดซับของโลหะลงบนตัวรองรับ 1 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดย ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะให้ความหนาแน่นกระแสและความเสถียรที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการใช้เวลาดูดซับโลหะบนตัวรองรับ 24 ชั่วโมง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสานักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

เอกสารอ้างอิง

A. Brouzgou, A. Podias, P. Tsiakaras. 2013. PEMFCs and AEMFCs directly fed with ethanol: a current status comparative review. **International Journal of Hydrogen Energy** 38: 9438-9453.

Changwei Xu, Liqiang Cheng, Peikang Shen, Yingliang Liu. 2007. Methanol and ethanol electrooxidation on Pt and Pd supported on carbon microspheres in alkaline media. **Electrochemistry Communications** 9 : 997-1001

Z.X. Liang, T.S. Zhao, J.B. Xu, L.D. Zhu. 2009. Mechanism study of the ethanol oxidation reaction on Palladium in alkaline media. **Electrochimica Acta** 54 : 2203-2208

S. Yongprapat, A. Therdthianwong, S. Therdthianwong. 2012. Au/C catalyst prepared by polyvinyl alcohol protection method for direct alcohol alkaline exchange membrane fuel cell application. **J Appl Electrochem** 42 : 483-490

การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการพัฒนาเส้นทางจักรยานในพื้นที่กลุ่มกรุงเทพฯ เหนือ

Stakeholder Participation in Bike Route Development in Northern Bangkok Area

สุภาพร แก้วกอ เลี่ยวไพโรจน์[1*] ธนภณ พันธเสน[1] พัฑรา สืบศิริ[2] และ บาธ ลัมเบร็กส์[1]

Supaporn Kaewko Leopairojna[1*], Tanapon Pantasen[1], Pattra Suebsiri[2] and Bart Lambregts[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบเส้นทางจักรยานนำร่อง ในพื้นที่กลุ่มกรุงเทพฯ เหนือ คณะผู้วิจัยได้ทำงานร่วมกับเจ้าหน้าที่สำนักงานเขต เลือกเส้นทางที่มีประชาชนจำนวนมากใช้เดินทางโดยจักรยานเป็นประจำ สำรวจ และประเมินความเหมาะสมของเส้นทาง เพื่อคัดเลือกเส้นทางจักรยานนำร่อง จัดทำแนวคิดในการปรับปรุงสภาพแวดล้อมทางกายภาพ จัดประชุมรับฟังความคิดเห็น คณะผู้วิจัยได้จัดทำแนวทางการปรับปรุงเส้นทางนำร่องเสนอต่อกรุงเทพมหานคร (กทม.) เพื่อนำผลการวิจัยไปสู่การปฏิบัติต่อไป การดำเนินงานวิจัยนี้ เน้นการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ผลการศึกษา พบว่า ประชาชนส่วนใหญ่ ไม่ต้องการเส้นทางจักรยานบนถนนสายย่อยหรือในซอย แต่ต้องการเส้นทางจักรยานบนถนนรองและหลัก ซึ่งแตกต่างจากนโยบายที่ กทม. กำหนดไว้ นอกจากนั้นยังพบว่า ระดับการมีส่วนร่วมในแต่ละเขตมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความมุ่งมั่นของสำนักงานเขต อย่างไรก็ตาม การทำงานร่วมกันหลายฝ่าย ทำให้เกิดการถ่ายทอดความรู้หลายด้าน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการทำงานของสำนักงานเขต ในการปรับปรุงโครงข่ายทางจักรยานให้ครอบคลุมพื้นที่เขต และสอดคล้องกับความต้องการของประชาชนต่อไป

ABSTRACT

This research aims to study and design pilot bicycle routes in the northern Bangkok. The researchers cooperated with district officers in selecting routes that a lot of residents travel by bicycles regularly. The selected routes were surveyed and evaluated to indicate pilot bicycle routes in each district. Physical environment improvements on the pilot bicycle routes were provided and presented in meetings with stakeholders. Guidelines were reported to Bangkok Metropolitan Administration (BMA) for implementation. This research emphasized in stakeholder participation. The results show that the residents require bicycle routes on collector and main roads, not local roads. This requirement was not according to BMA bicycle policy. The researchers also found that levels of participation in each district were different depending on willingness of district officers. However, this research collaboration created knowledge transfers that would be benefits for the district officers in improving bicycle routes in their districts according to residents' requirements.

Key Words: Non-motorized transportation, Bicycle routes, Stakeholder Participation

Corresponding author; e-mail address: **supaporn_k@hotmail.com**

[1]ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2] ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพฯ 10220

[2] Department of Architecture, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok 10220

คำนำ

กรุงเทพมหานคร (กทม.) หน่วยงานภาครัฐและเอกชนที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนการขนส่ง และสถาบันการศึกษา ได้ร่วมกันผลักดันให้การเดินเท้าและการใช้จักรยานในชีวิตประจำวัน ให้เป็นวิถีชีวิตของผู้คนในสังคมไทย กทม. โดยคณะอนุกรรมการด้านกายภาพและการส่งเสริมการใช้จักรยานในกรุงเทพฯ ได้มีแผนปรับปรุงเส้นทางจักรยานชุมชน ซึ่งได้มีการมอบหมายให้สำนักงานเขต 50 เขต สำรวจพื้นที่ ตรอก ซอก ซอย เพื่อค้นหาเส้นทางจักรยานในชุมชนที่มีอยู่ หรือเส้นทางที่ประชาชนใช้งานเป็นประจำ (ธีรวัจน์ หงส์แสนยาธรรม, 2557) จากนั้นให้กำหนดเส้นทางนำร่องที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบขนส่งมวลชน และถนนสายหลักให้เป็นเครือข่ายเดียวกัน พร้อมสำรวจปัญหาที่ต้องการให้ดำเนินการปรับปรุงและพัฒนา ให้สามารถใช้จักรยานสัญจรได้จริงอย่างปลอดภัย โดยอาจมีความเชื่อมโยงกับเส้นทางจักรยานของพื้นที่เขตใกล้เคียง อีกทั้งสามารถเชื่อมโยงกับระบบขนส่งมวลชนสาธารณะอื่นๆ ซึ่งในอนาคตจะได้พัฒนาเป็นโครงข่ายเส้นทางจักรยานในเขตเมืองต่อไป กทม. จึงมอบหมายให้ให้มหาวิทยาลัยทั้ง 7 แห่ง ได้แก่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำหน้าที่เป็นที่ปรึกษา ภายใต้การอำนวยการของสมาคมจักรยานเพื่อสุขภาพไทย เพื่อให้คำแนะนำ และกำหนดแนวทางการทำงานแก่สำนักงานเขต ในการกำหนดกรอบการเก็บข้อมูล ประมวลข้อมูล วิเคราะห์ผล สรุปผล จัดทำรายงานทางวิชาการ ทั้งนี้ สำนักงานเขตเป็นผู้ประสานงานผู้นำชุมชน โรงเรียน วัด โรงพยาบาล และ/หรือ องค์กรที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ แจกแบบสอบถามตามความจำเป็น สำรวจรายละเอียดกายภาพและเขียนแบบก่อสร้าง รวมทั้งจัดการประชุม เมื่อการศึกษาแล้วเสร็จ กทม. จะได้พัฒนาเส้นทางจักรยานนำร่อง ไปสู่การใช้จักรยานเพื่อการออกกำลังกาย กิจกรรมนันทนาการและการท่องเที่ยวต่อไป (ตรีดาว อภัยวงศ์, 2556) คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้รับมอบหมายให้ดำเนินงานร่วมกับสำนักงานเขตในกลุ่มกรุงเทพฯ เหนือ 7 เขต ได้แก่ เขตลาดพร้าว เขตบางเขน เขตสายไหม เขตหลักสี่ เขตดอนเมือง เขตจตุจักร และเขตบางซื่อ โดยดำเนินการช่วงเดือนกรกฎาคม 2557 - กันยายน 2558 รวมระยะเวลา 15 เดือน

การตรวจเอกสาร

เกณฑ์การคัดเลือกเส้นทางจักรยานนำร่อง

การคัดเลือกเส้นทางจักรยานนำร่อง เพื่อปรับปรุงและพัฒนาเส้นทางให้เหมาะสมต่อการใช้จักรยานเพื่อการสัญจร ใช้ตัวแปรหลัก 3 ตัวแปร คือ การเชื่อมต่อ ความปลอดภัย และความสะดวกสบายของผู้ใช้จักรยาน ซึ่งนำมาจากหลักการของ CROW (2006) และ Southworth (2005) ดังนี้

1) การเชื่อมต่อ (Connectivity) แบ่งเป็นการเชื่อมต่อ 3 ลักษณะ คือ

1.1) การเชื่อมต่อกับโครงข่ายเส้นทางจักรยาน เส้นทางจักรยานควรทำให้เกิดการเชื่อมโยงต่อไปยังเส้นทางจักรยานเดิมที่มีอยู่แล้ว และทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างเขตและกลุ่มเขตในวงกว้าง

1.2) การเชื่อมต่อกับการขนส่งสาธารณะ เส้นทางจักรยานควรทำให้เกิดการเข้าถึง หรือเชื่อมโยงต่อไปยังจุดขึ้น-ลงของระบบขนส่งสาธารณะ ได้แก่ รถโดยสารประจำทาง รถไฟฟ้า และเรือ

1.3) การเชื่อมต่อกับสถานที่ เส้นทางจักรยานควรทำให้เกิดการเข้าถึง หรือเชื่อมโยงต่อไปยังสถานที่ที่ผู้คนใช้ทำกิจกรรมในชีวิตประจำวัน เช่น ร้านค้า ร้านอาหาร สถานที่พักผ่อนหย่อนใจ สถานศึกษา ย่านการค้า

ตลาด เป็นเส้นทางสำหรับประชาชน เพื่อใช้ในชีวิตประจำวัน และ/หรือเส้นทางที่นักท่องเที่ยว สามารถเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวภายในชุมชน

2) ความปลอดภัย (Safety) มุ่งเน้นความปลอดภัยในการจราจร ปลอดภัยจากอุบัติเหตุทางถนนมากกว่าความปลอดภัยทางสังคมหรืออาชญากรรม เส้นทางจักรยานควรเลือกใช้ทางเฉพาะสำหรับจักรยาน หลีกเลี่ยงการนำทางเดินเท้ามาแบ่งเป็นทางจักรยาน ยกเว้นแต่เป็นส่วนที่จำเป็นต้องใช้เพื่อการเชื่อมต่อทาง

3) ความสะดวกสบาย (Comfort) หมายถึง การไม่มีสิ่งกีดขวาง พื้นผิวเรียบ มีเครื่องหมายหรือป้ายจราจรที่เหมาะสม และมีการปกป้องจากปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความรู้สึกไม่สบายแก่ผู้ขี่จักรยาน

รูปแบบทางจักรยาน

การปรับปรุงทางจักรยานนำร่องในพื้นที่ศึกษา ใช้แนวคิดของการออกแบบทางจักรยานในประเทศเนเธอร์แลนด์ ที่เน้นการป้องกันและการลดความรุนแรงของการบาดเจ็บจากอุบัติเหตุทางถนนของผู้ใช้จักรยาน โดยการแบ่งรูปแบบทางจักรยานตามประเภทของถนน คือ ถนนสายหลัก ถนนสายรอง และถนนสายย่อย ซึ่งมีการจำกัดความเร็วของยานพาหนะที่แตกต่างกัน Bongers and Veen (2013) และ Lange (2013) อธิบายการแบ่งรูปแบบทางจักรยาน 3 ระดับ ดังแสดงใน Figure 1 และรายละเอียดต่อไปนี้

1) ทางจักรยานใช้ร่วมกันรถยนต์ (Mixed traffic) เป็นทางจักรยานในพื้นที่ที่มีการจำกัดความเร็วของรถยนต์ไม่เกิน 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีการออกแบบหรือติดตั้งอุปกรณ์เพื่อลดความเร็วของรถยนต์ ทำให้จักรยานและยานพาหนะอื่นๆ ใช้พื้นที่ถนนร่วมกันได้

2) ทางจักรยานบริเวณไหล่ทาง (Cycle lane) เป็นการจัดช่องทางจักรยานบริเวณริมถนนหรือไหล่ทาง โดยการตีเส้นแบ่งเป็นช่องทางจักรยาน และจัดทำสัญลักษณ์จักรยาน เหมาะกับถนนที่จำกัดความเร็วของยานพาหนะไม่เกิน 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3) ทางเฉพาะสำหรับจักรยาน (Cycle path) เป็นการจัดช่องทางจักรยานโดยมีเครื่องกั้นระหว่างทางจักรยานและถนน เหมาะกับถนนสายหลักที่จำกัดความเร็วของยานพาหนะมากกว่า 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

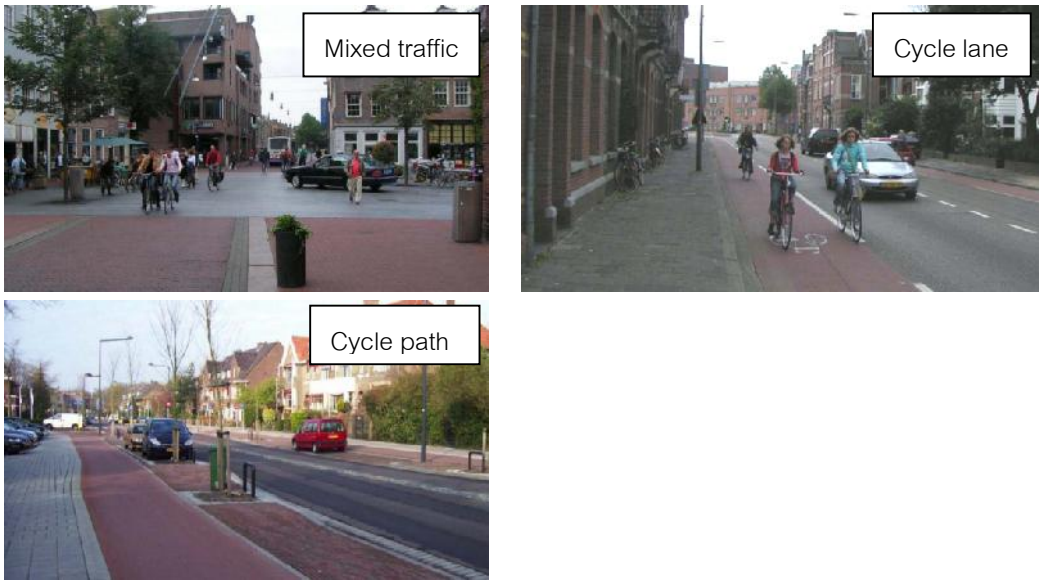


Figure 1 Types of cycle-infrastructure

Source Bongers and Veen (2013)

การปรับปรุงสภาพทางกายภาพของถนนเพื่อจัดทำทางจักรยาน

หลายเมืองที่ได้เริ่มส่งเสริมการใช้จักรยาน และพยายามจัดสร้างเส้นทางจักรยาน แต่ไม่สามารถขยายถนนในเมืองได้ เช่นเดียวกับถนนในกรุงเทพฯ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงสภาพทางกายภาพของถนนเพื่อจัดทำเส้นทางจักรยาน (Retrofitting bike lane) Federal Highway Administration (FHWA, 2006) อธิบายว่า การปรับปรุงสภาพทางกายภาพของถนนเพื่อจัดทำทางจักรยานมี 3 วิธี คือ 1) การลดความกว้างของช่องจราจร เพื่อแบ่งพื้นที่ถนน จัดทำเป็นทางจักรยาน และลดความเร็วของรถยนต์ เพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ใช้จักรยาน 2) การลดจำนวนช่องจราจรสำหรับรถยนต์ หรือปรับการเดินรถเป็นแบบทางเดียว (one-way) เพื่อแบ่งพื้นที่ถนน จัดทำเป็นทางจักรยานและ 3) การยกเลิกหรือปรับปรุงการจอดรถบริเวณริมถนน ซึ่งต้องมีการปรึกษาหารือร่วมกับหน่วยงานในท้องถิ่น และร้านค้าหรือบ้านเรือนที่ได้รับผลกระทบจากการยกเลิกการจอดรถ Figure 2 แสดงรูปตัดถนนในรัฐโอเรกอน สหรัฐ ก่อนและหลังการปรับลดความกว้างของช่องจราจร ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อจัดทำทางจักรยานบนถนนสายหลักและถนนสายรองในกรุงเทพฯ ได้ โดยต้องทำร่วมกับวิธีการยกเลิกหรือปรับปรุงการจอดรถบริเวณริมถนน เพื่อลดความขัดแย้งระหว่างผู้ที่ใช้และไม่ใช้จักรยาน

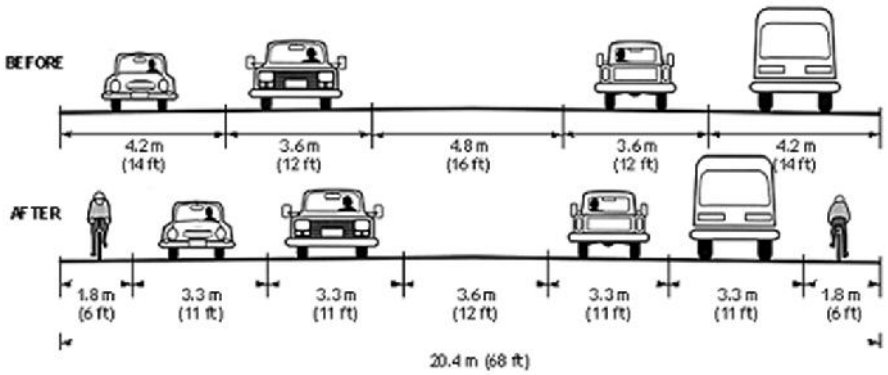


Figure 2 Retrofitting bike lane; reducing travel lane in Oregon, USA

Source FHWA (2006)

การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย คือ บุคคล กลุ่มคน หรือหน่วยงาน ที่ให้ความสนใจต่อผลของโครงการหรือกิจกรรมต่างๆ ที่หน่วยงานใดหน่วยงานหนึ่งดำเนินการ (Bryson, 1988) ระดับการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียขึ้นอยู่กับระดับความสนใจ และการให้ความสำคัญของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อผลของโครงการ ในงานวิจัยนี้ ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียประกอบด้วยภาครัฐและภาคเอกชน ได้แก่ ผู้บริหารในแต่ละเขต หัวหน้าฝ่ายโยธา หัวหน้าฝ่ายพัฒนาชุมชนและสวัสดิการสังคม หัวหน้าฝ่ายเทศกิจ สมาชิกสภาเขตและสภากรุงเทพมหานคร ตำรวจจราจร สำนักจราจรและขนส่ง กทม. หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมทางหลวง การรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) การรถไฟฟ้ามหานคร (รฟม.) ผู้แทนจากสถาบันการศึกษา หน่วยงานภาคเอกชน สมาชิกชมรมจักรยาน ผู้ประกอบการจักรยานยนต์รับจ้างและค้าขาย ประชาชนและผู้นำชุมชนที่อยู่ในแนวเส้นทาง การดำเนินการวิจัยโดยเน้นการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียช่วยให้เจ้าหน้าที่สำนักงานเขต ได้ทำงานใกล้ชิดกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและประชาชน รับทราบปัญหาและความต้องการ ลดความขัดแย้งและต่อต้าน ประชาชนและหน่วยงานต่างๆ ได้ร่วมคิด ร่วมตัดสินใจ ร่วมรับประโยชน์ และร่วมประเมินผลการพัฒนาเส้นทางจักรยานในชุมชนที่อยู่อาศัย หรือพื้นที่รับผิดชอบของตน

ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานโครงการ แบ่งเป็น 6 ขั้นตอน โดยให้ครอบคลุมการมีส่วนร่วมคิด ร่วมตัดสินใจ ร่วมรับประโยชน์ และร่วมประเมินผลของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกกลุ่ม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 มอบหมายให้ฝ่ายโยธาและฝ่ายพัฒนาชุมชนของสำนักงานเขต สำรวจเส้นทางที่ประชาชนจำนวนมากใช้จักรยานเพื่อการเดินทาง รวมทั้งปัญหาอุปสรรคในการเดินทาง และส่งข้อมูลไปยังมหาวิทยาลัย

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษารายละเอียดเส้นทางและแผนที่จากทุกเขต สำรวจภาคสนาม ประเมินความเหมาะสมของเส้นทางตามเกณฑ์การคัดเลือกเส้นทางจักรยานนำร่อง และเสนอแนะเส้นทางจักรยานนำร่อง 3 เส้นทาง

ขั้นตอนที่ 3 จัดประชุมร่วมกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ครั้งที่ 1 เพื่อนำเสนอเส้นทางจักรยานนำร่องและแนวทางการปรับปรุง และรับฟังความคิดเห็น เพื่อสรุปเส้นทางจักรยานนำร่อง 3 เส้นทางในแต่ละเขต

ขั้นตอนที่ 4 สำรวจรายละเอียดกายภาพเส้นทางนำร่อง 3 เส้นทาง และจัดทำแบบร่างและทางเลือกในการปรับปรุงเส้นทางนำร่องในเบื้องต้น เพื่อนำเสนอต่อสำนักงานเขตและผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

ขั้นตอนที่ 5 จัดประชุมร่วมกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ครั้งที่ 2 เพื่อนำเสนอทางเลือกในการปรับปรุงเส้นทางนำร่อง จัดทำแบบสอบถามเพื่อเพิ่มช่องทางในการเสนอความคิดเห็นแก่ผู้เข้าร่วมการประชุม สรุปเส้นทางนำร่องที่เหมาะสมมากที่สุดเขตละ 1 เส้นทาง และแนวทางการปรับปรุง ในขั้นตอนนี้ มีการแจกแบบสอบถามเพิ่มเติมในเขตดอนเมือง เขตบางซื่อ เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการคัดเลือกเส้นทางนำร่องที่เหมาะสมมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 6 จัดลำดับความสำคัญของเส้นทางจักรยานนำร่องของกล่มกรุงเทพฯ เหนือ โดยใช้ตัวชี้วัดตามเกณฑ์การคัดเลือกเส้นทางจักรยานนำร่อง และเกณฑ์ความเป็นไปได้ของโครงการ คือ ปริมาณผู้ใช้เส้นทาง ความรวดเร็วที่จะได้ใช้เส้นทางนำร่อง และการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย พร้อมทั้งเสนอแนวทางการปรับปรุง

ทั้งนี้ หากสำนักงานเขตใด สามารถจัดหางบประมาณและดำเนินการสร้างเส้นทางนำร่องได้สำเร็จ ทางมหาวิทยาลัยจะจัดการประเมินหลังเปิดใช้เส้นทาง โดยการสอบถามความคิดเห็นและความพึงพอใจในประโยชน์ที่ได้รับและปัญหาที่พบ จากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอีกครั้ง เพื่อนำไปสู่การสร้างมาตรฐานเส้นทางจักรยานของ กทม. ในอนาคต

ผลการศึกษา

หลังการประชุมร่วมกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกเส้นทางจักรยานนำร่องที่เหมาะสมมากที่สุดเขตละ 1 เส้นทาง พบว่า เส้นทางจักรยานนำร่องที่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต้องการ เป็นเส้นทางบนถนนสายหลักและถนนสายรอง ดังแสดงใน Table 1 คณะผู้วิจัยได้จัดลำดับความสำคัญของเส้นทาง เพื่อสรุปเส้นทางนำร่องเส้นทางแรกของกลุ่มกรุงเทพฯ เหนือ โดยมีตัวชี้วัด ได้แก่ 1) การเชื่อมต่อกับระบบขนส่งมวลชนและสถานที่สำคัญต่างๆ 2) ความปลอดภัยจากอุบัติเหตุทางถนน 3) ความสะดวกสบาย 4) ปริมาณกลุ่มเป้าหมายรับบริการ

5) ความเป็นไปได้ในการก่อสร้าง และ 6) การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ซึ่งพิจารณาทั้งจำนวนและความหลากหลายของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เข้าร่วมการประชุม ดังแสดงใน Table 2

Table 1 Pilot bicycle routes in Northern Bangkok Area

Districts	Routes	Road types	Speed limit
Ladprao	Naknivas Road	Collector road	< 50 km/hr
Chatuchak	Tessabansongkhrao Road	Main road	> 50 km/hr
Bangsue	Bangkok-Nonthaburi Road	Main road	> 50 km/hr
Bangkhen	Soi Ram-intra 21	Local road	< 50 km/hr
Laksi	Soi Changwattana 5	Local road	< 50 km/hr
Donmoung	Terdrachun Road	Main road	> 50 km/hr
Saimai	Soi Saimai 43	Local road	< 50 km/hr

Table 2 Evaluation of the pilot bicycle routes in Northern Bangkok Area

Criterions	Diatricts						
	Ladprao	Chatuchak	Bangsue	Bangkhen	Laksi	Donmoung	Saimai
Connectivity	4.5	4.5	5	4	5	3.5	4
Safety	4.5	4	5	5	4	5	4
Convenient	4.5	4.5	4.5	5	4	4	4
Number of cyclists	4	4.5	4.5	4	5	3.5	5
Potential	3.5	3	5	5	4	4.5	4.5
Participation	4	4	4.5	3.5	5	4.5	5
Total	25	24.5	28.5	26.5	27	25	26.5
Rank	4	5	1	3	2	4	3

จาก Table 2 พบว่า เส้นทางจักรยานนำร่องของเขตบางซื่อ คือ เส้นทางจักรยานตามแนวถนนกรุงเทพฯ - นนทบุรี มีความเหมาะสมเป็นเส้นทางจักรยานนำร่องของกลุ่มกรุงเทพฯ เหนือมากที่สุด เนื่องจากเส้นทางมีความสอดคล้องกับหลักการของ CROW (2006) และ Southworth (2005) กล่าวคือ เส้นทางเชื่อมโยงสู่สถานีรถไฟฟ้า 3 สายโดยตรง คือ สายสีม่วง แดง และน้ำเงิน และเชื่อมโยงสถานที่สำคัญต่างๆ เช่น โรงเรียน 3 แห่ง ห้างบิ๊กซี ตลาดบางซ่อน ตลาดเตาปูน เส้นทางนำร่องนี้มีความเป็นไปได้ในการก่อสร้างและมีความรวดเร็วที่จะได้ใช้เส้นทาง เนื่องจากถนนกรุงเทพฯ -นนทบุรี มีพื้นที่ถนนเหลือจากการสร้างเสารถไฟฟ้า สามารถปรับช่องจราจรตามแนวคิดการปรับปรุงสภาพทางกายภาพของถนนเพื่อจัดทำเส้นทางจักรยาน และจัดทำทางเฉพาะสำหรับจักรยานความกว้างประมาณ 1.50 เมตร ได้อย่างปลอดภัยและสะดวกสบาย ตามรูปแบบทางจักรยานระดับที่ 3

ซึ่งเป็นทางเฉพาะจักรยานบนถนนสายหลัก ที่รถยนต์ใช้ความเร็วมากกว่า 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป ตามแนวคิดการออกแบบทางจักรยานในประเทศเนเธอร์แลนด์ (Bongers and Veen, 2013 และ Lange, 2013) โดยใช้เสากั้นเขตจราจรเป็นเครื่องกั้นระหว่างจักรยานและยานพาหนะอื่นๆ และป้องกันไม่ให้รถยนต์จอดบนทางจักรยาน รวมทั้งปรับปรุงผิวทาง ทาสี ตีเส้นแบ่งช่องทาง และติดตั้งป้ายจราจร ดังแสดงใน Figure 3 นอกจากนั้นจากการทำแบบสอบถาม พบว่า มีปริมาณกลุ่มเป้าหมายรับบริการสูง และในการจัดประชุม มีผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเข้ามามีส่วนร่วมกับโครงการจำนวนมาก ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้เสนอให้ กทม. พัฒนาเส้นทางนี้เป็นเส้นทางนำร่องเส้นทางแรกของกลุ่มกรุงเทพฯ เหนือ



Before After

Figure 3 The first pilot bicycle route in Northern Bangkok Area: Bangkok-Nonthaburi Road

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบเส้นทางจักรยานนำร่องในพื้นที่กลุ่มกรุงเทพฯ เหนือ 7 เขต โดยเน้นการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ได้แก่ ผู้บริหารและเจ้าหน้าที่สำนักงานเขต หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน ประชาชนและผู้ประกอบการในพื้นที่ ผลการศึกษา พบว่า ประชาชนส่วนใหญ่ ไม่ต้องการเส้นทางจักรยานบนถนนสายย่อยหรือในซอย เนื่องจากสามารถใช้จักรยานเพื่อการเดินทางในชีวิตประจำวันได้อยู่แล้ว แต่ต้องการเส้นทางจักรยานบนถนนสายรองและถนนสายหลัก เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้จักรยาน จะเห็นได้ว่า ความต้องการของประชาชนแตกต่างจากนโยบายของ กทม. ที่มอบหมายให้สำนักงานเขตสำรวจพื้นที่ ตรอก ซอก ซอย เพื่อปรับปรุงให้เป็นเส้นทางจักรยานชุมชน ดังนั้น กทม. ควรจัดประเภทของถนน และปรับปรุงทางจักรยานให้มีรูปแบบที่สอดคล้องกับประเภทของถนน ตามวิธีการออกแบบทางจักรยานในประเทศเนเธอร์แลนด์ เพื่อสร้างความมั่นใจในการใช้จักรยานอย่างปลอดภัยแก่ประชาชน จะเป็นการส่งเสริมให้ประชาชนเดินทางด้วยจักรยานมากขึ้น คณะผู้วิจัยได้จัดทำสรุปเส้นทางนำร่องและแนวทางการปรับปรุงเสนอต่อ กทม. เพื่อนำผลการวิจัยไปสู่การปฏิบัติต่อไป อย่างไรก็ตาม สำนักงานเขตมีอำนาจหน้าที่ดูแลเฉพาะถนนสายย่อยหรือซอย ดังนั้น สำนักงานเขตควรประสานงานกับหน่วยงานที่ดูแลถนนสายหลักและถนนสายรอง เช่น สำนักการโยธาและสำนักการจราจรและขนส่ง กทม. เพื่อพัฒนาเส้นทางจักรยานนำร่องต่อไป และควรจำกัดความเร็วของยานพาหนะบนถนนสายย่อยหรือในซอยที่ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ใช้จักรยาน นอกจากนั้น จากการดำเนินการศึกษา พบว่า ระดับการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในแต่ละเขตมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความ

มุ่งมั่นของสำนักงานเขต และการให้ความสำคัญต่อการส่งเสริมการใช้จักรยานของผู้บริหารและฝ่ายโยธาเขต อย่างไรก็ตาม การทำงานร่วมกันหลายฝ่าย ทำให้เกิดการถ่ายทอดความรู้หลายด้าน โดยเฉพาะการศึกษาความต้องการของประชาชน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการทำงานของเจ้าหน้าที่สำนักงานเขต ในการปรับปรุงโครงข่ายทางจักรยานให้ครอบคลุมพื้นที่เขต และสอดคล้องกับความต้องการของประชาชนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ตรีดาว อภัยวงศ์. 2556. กทม.ประสาน 6 มหาวิทยาลัย ร่วมสำรวจเส้นทางจักรยาน เพื่อนำมาพัฒนาสู่โครงข่ายจักรยานให้สามารถใช้งานได้จริง. **สำนักข่าวแห่งชาติ กรมประชาสัมพันธ์**. (21 พฤศจิกายน 2556). แหล่งที่มา: http://thainews.prd.go.th, 21 มกราคม 2557.

ธีรวัจน์ หงส์แสนยาธรรม. 2557. ผุดทาง “ปั่น” ชุมชน 50 เขต. **สยามรัฐออนไลน์**. (6 มกราคม 2547). แหล่งที่มา: http://www.siamrath.co.th, 21 มกราคม 2557.

Bongers, A. and Veen, D. 2013. **Sustainable safety: Bicycle inclusive planning and design**. Available source: http://www.dutchcycling.nl/library/file/Bicycle%20inclusive%20planning%20and%20design%20ThinkBike%20Helsinki.pdf, April 12, 2014.

Bryson, John M. 1988. **Strategic Planning for Public and Nonprofit Organizations: A Guide to Strengthening and Sustaining Organization Achievement**. Jossey-Bass Inc. Publishers. San Francisco.

CROW. 2006. Ontwerpwijzer Fietsverkeer [**Design guidance for cycling infrastructure**; in Dutch]. Ede: CROW, 2006.

Federal Highway Administration. (FHWA). 2006. **Federal Highway Administration University Course on Bicycle and Pedestrian Transportation**. Available source: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/pedbike/05085/, April 10, 2014.

Lange, M. 2013. **Cycling in The Netherlands: Past, present and future**. Available source: http://www.dutchcycling.nl/library/file/Cycling%20in%20the%20Netherlands%20past%20present%20and%20future%20compressed%20pictures.pdf, April 12, 2014.

Southworth, M. 2005. Designing the walkable city. **Journal of Urban Planning and Development**, Vol. 131, No. 4, pp. 246-257.

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์สับปะรดแปรรูปในกระป๋อง

Life Cycle Assessment of Canned Pineapple Product

หัทยา ทรงนิรันดร[1*] และ ปุณณมี สัจจกมล[1]

Hattaya Thongnirundorn[1*] and Punnamee Sachakamol[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์สับปะรดแปรรูปในกระป๋องโดยประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต โดยเรียกว่า การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ Life Cycle Assessment (LCA) เป็นการประเมินตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่ง และการใช้งานจนถึงการกำจัดซาก เพื่อประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ โดยการประเมินปริมาณการใช้ทรัพยากรน้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ หรือ ร่องรอยการใช้น้ำเพื่อได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ (Water Footprint) ก็เป็นหนึ่งในปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญกับผลิตผลทางการเกษตร จากการศึกษาพบว่าการได้มาซึ่งสับปะรดบรรจุกระป๋องในน้ำเชื่อม ขนาด 20 ออนซ์ น้ำหนักสุทธิ 267 กรัม จำนวน 1 กระป๋อง สับปะรดบรรจุกระป๋องในน้ำสับปะรดขนาด 108 ออนซ์ น้ำหนักสุทธิ 3,160 กรัม จำนวน 1 กระป๋อง และน้ำสับปะรดเข้มข้นบรรจุถัง น้ำหนัก 263 กิโลกรัม จำนวน 1 ถัง ใช้ทรัพยากรน้ำให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์เท่ากับ 207 2,164 และ 119,477 ลิตรเทียบเท่า (L H_2O eq.) ตามลำดับ ซึ่งผลการประเมินทางสิ่งแวดล้อมสามารถทราบถึงสถานะทางสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์รวมถึงต้นทุนในกระบวนการผลิต ทรัพยากรที่ใช้เกินความจำเป็นเพื่อส่งเสริมผลิตภัณฑ์ให้มีคุณค่าทางสิ่งแวดล้อม

ABSTRACT

The research investigates the Life Cycle Assessment (LCA) of canned pineapple products by assessing the impact on the environment. This method evaluates thoroughly the full cycle (Raw material acquisition, Productions, Assembly, Product consumption and recycle of products). Water is one of the most important factor to growth pineapple, therefore this research focuses mainly on the amount of water consumed on the product processes, so called “Water Footprint.” The study finds that 20 Oz canned pineapple in syrup with 267 grams net weighted, 108 Oz canned pineapple in pineapple juice with 3,160 grams net weighted, and concentrated pineapple juice with 263 kilograms net weighted, are consumed the water for the amount of 207, 2,164 and 119,477 L H_2O eq., respectively. The environmental assessment of this study indicates the environmental impact of products, process costs and redundant resources. Therefore, optimization of resources consumed in the process can be performed and evaluated.

Key Words: life Cycle Assessment, Pineapple, Water Footprint

*Corresponding author; e-mail address: pang.force@gmail.com

[1]ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

อุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มว่าจะเติบโตขึ้นในอนาคต เนื่องจากสับปะรดมีการเพาะปลูกจำนวนมากในประเทศไทยจัดเป็นพืชที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมการเกษตรอันดับต้น ๆ และนิยมนำมาเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปสู่ตลาดทั้งภายในประเทศ และนอกประเทศ ซึ่งประเทศไทยมีแหล่งเพาะปลูกสับปะรดที่สำคัญ ได้แก่ ประจวบคีรีขันธ์ ระยอง ชลบุรี เพชรบุรี พิษณุโลก มีผลผลิตออกมาก ช่วงเดือนมีนาคม-มิถุนายน และพฤศจิกายน-มกราคม พันธุ์ที่เกษตรกรนิยมปลูกมาก ได้แก่ ปัตตาเวีย และ ตราดสีทอง ผลผลิตสับปะรดสดภายในประเทศร้อยละ 70-80 จะส่งเข้าโรงงานแปรรูป ที่เหลือใช้บริโภคสดภายในประเทศร้อยละ 20-30 ในประเทศไทยมีเนื้อที่ในการเก็บเกี่ยว 494,252 ไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการส่งออกสับปะรดและผลิตภัณฑ์สับปะรด ได้แก่ สับปะรดสด สับปะรดแช่เย็น สับปะรดแช่แข็ง สับปะรดแห้ง สับปะรดกวน สับปะรดกระป๋อง และน้ำสับปะรดเข้มข้น โดยมีปริมาณการส่งออกรวมผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 668,729 ตัน และมูลค่าการส่งออกรวมผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 23,457 ล้านบาท ซึ่งน้ำสับปะรดและสับปะรดกระป๋องมีปริมาณการส่งออก 104,557 และ 518,569 ตัน และมูลค่าการส่งออก 4,264 และ 16,052 ล้านบาท ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการส่งออกอันดับต้นๆ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) มีประเทศคู่ค้าที่สำคัญ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา เยอรมนี รัสเซีย เนเธอร์แลนด์ สเปน ญี่ปุ่น และอิหร่าน ครองส่วนแบ่งตลาดร้อยละ 50 ของตลาดสับปะรดโลก เป็นสินค้าที่มีศักยภาพทางการผลิต และการตลาดสูงจึงจัดได้ว่าอุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋องเป็นอุตสาหกรรมที่น่าสนใจ และควรสนับสนุนส่งเสริมในประเทศไทย โดยมีแนวโน้มเห็นได้ว่าสับปะรดกระป๋องเป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในความต้องการของตลาดโลกในระยะเวลายาวนาน ซึ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นรากฐานมั่นคงต่อเศรษฐกิจของประเทศ

เนื่องจากพืชส่วนใหญ่มีความต้องการน้ำปริมาณมากโดยเฉพาะสับปะรดต้องใช้น้ำเป็นปริมาณมหาศาลในการเพาะปลูก ซึ่งสถานการณ์น้ำในปัจจุบันของแหล่งเก็บน้ำในประเทศไทยมีสภาวะการแห้งแล้ง และมีการขาดแคลนน้ำที่ใช้ในการเพาะปลูกและการบริโภคจึงทำให้รัฐบาลให้ความสำคัญในการใช้น้ำภายในประเทศไทยและส่งผลให้ผลผลิตของสับปะรดน้อยลง ดังนั้นผู้วิจัยเห็นความสำคัญในการควบคุมการใช้น้ำ และใช้น้ำให้มีคุณค่ามากที่สุดเพื่อป้องกันปัญหาการขาดแคลนน้ำ และแก้ปัญหาข้อกีดกันทางการค้าที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต เนื่องจากสหภาพยุโรปมีข้อกำหนดการนำเข้าสินค้าทางสิ่งแวดล้อม และในหลายประเทศเริ่มออกข้อกำหนดทางการค้าอย่างจริงจังมากขึ้น การศึกษาครั้งนี้จึงให้ความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมโดยการเก็บข้อมูลปริมาณทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิตเพื่อนำมาประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อนำไปสู่การเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันสู่ตลาดโลก

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. โปรแกรมการคำนวณ Microsoft Excel 2010
2. โปรแกรม Sigma Pro 7.1

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) การเก็บรวบรวมข้อมูลจากโรงงานอุตสาหกรรมสับปะรดบรรจุกระป๋องทั้ง 3 โรงงานตัวอย่าง การวัดค่าจริงจากหน้างาน และสอบถามข้อมูลจากตัวแทนเกี่ยวกับกระบวนการผลิต กำลังการผลิต และปริมาณการส่งออกของทั้ง 3 โรงงานคิดเป็นร้อยละ 35 ของการส่งออกประเทศ

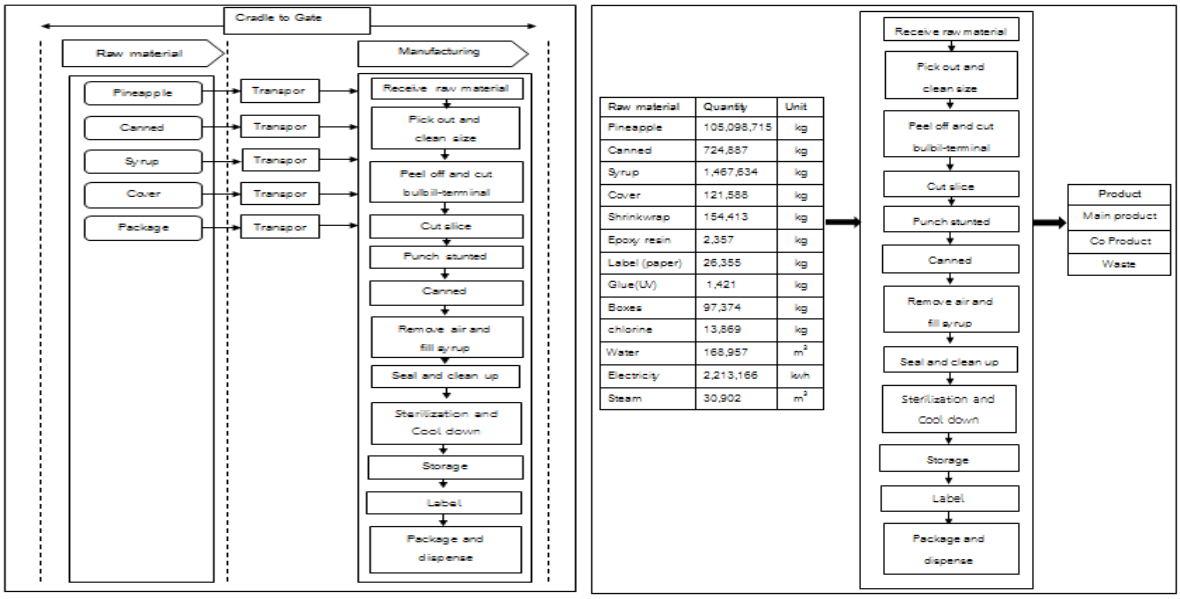
2. ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) การหาค่าสัมประสิทธิ์ของร่องรอยการใช้น้ำจากโปรแกรม Sigma Pro 7.1 และฐานข้อมูลงานวิจัยจากสถาบันการศึกษาต่างๆ เช่น มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ข้อมูลการเพาะปลูกจากหน่วยงานต่างๆ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการโดยยึดหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตกับกรณีศึกษาจากทั้ง 3 โรงงาน จากการเก็บรวบรวมข้อมูลย้อนหลัง 1 ปี โดยมีขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์สับปะรดบรรจุกระป๋อง ดังนี้

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (Goal and Scope Definition) เป้าหมายของการศึกษา คือ การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ของสับปะรดบรรจุกระป๋องในน้ำเชื่อม ขนาด 20 ออนซ์ น้ำหนักสุทธิ 267 กรัม หน่วยหน้าที่ เพื่อการบริโภค 1 กระป๋อง สับปะรดบรรจุกระป๋องในน้ำสับปะรด ขนาด 108 ออนซ์ น้ำหนักสุทธิ 3,160 กรัม หน่วยหน้าที่ เพื่อการบริโภค 1 กระป๋อง และน้ำสับปะรดเข้มข้นบรรจุถัง น้ำหนัก 263 กิโลกรัม หน่วยหน้าที่ เพื่อการบริโภค 1 ถัง ขอบเขตของระบบในการประเมินแบบ Cradle-to-Gate (Business-to-Business:B2B) (Figure 1 (A))

2. การจัดทำบัญชีรายการ (Inventory Analysis) การจัดทำบัญชีรายการสารขาเข้า และสารขาออกของการตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบการเพาะปลูกสับปะรด การขนส่งวัตถุดิบมายังโรงงาน รวมถึงกระบวนการผลิต โดยสารขาเข้าหมายรวมถึงวัตถุดิบ ทรัพยากรและพลังงาน รวมถึงระบบ และวัสดุช่วยการผลิต สารขาออกหมายรวมถึง ผลิตภัณฑ์หลัก ผลิตภัณฑ์ร่วม และของเสีย (Figure 1 (B))



(A) (B)

Figure 1 Life cycle of a canned pineapple in syrup: 20 oz. (business-to-business: B2B) (A) and Input and output in manufacturing (B)

3. การประเมินผลกระทบ (Life Cycle Impact Assessment: LCIA) การประเมินค่าร่องรอยการใช้น้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์แปรรูปทั้ง 3 อย่าง จากข้อมูลการใช้ทรัพยากร พลังงาน และการปล่อยของเสียที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ถูกนำไปคำนวณเพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการโดยคำนวณออกมาในรูปของปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ เพื่อเป็นการเตรียมข้อมูลไว้ใช้ในการแปลผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์

4. การแปรผล (Interpretation) การแปรผลจากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ทราบถึงจุดที่ก่อให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และนำไปสู่แนวทางปรับปรุง ณ กระบวนนั้น

การคำนวณหาค่าการประเมินร่องรอยการใช้น้ำ

การคำนวณหาค่าการประเมินร่องรอยการใช้น้ำแต่ละประเภทมีความแตกต่างกัน โดยในการคำนวณในแต่ละประเภทนั้นยังแบ่งชนิดร่องรอยการใช้น้ำตามแหล่งที่มา ประกอบด้วยน้ำ 3 ส่วนคือ

1. ร่องรอยการใช้น้ำสีเขียว (Green water footprint) หมายถึง น้ำที่อยู่ในรูปของความชื้นในดินที่ถูกดึงไปใช้ และปริมาณน้ำฝน (Hoekstra et al., 2011)

2. ร่องรอยการใช้น้ำสีน้ำเงิน (Blue water footprint) หมายถึง ปริมาณน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติรวมทั้งแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดิน เช่น น้ำบาดาล น้ำจากอ่างเก็บน้ำ แม่น้ำ น้ำจากชลประทานที่ถูกดึงไปใช้ (Hoekstra et al., 2011)

3. ร่องรอยการใช้น้ำสีเทา (Grey Water Footprint) หมายถึง ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นกำหนดเป็นปริมาณน้ำจืดที่จำเป็นต้องใช้ในการเจือจางสารมลพิษที่ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำขึ้นอยู่กับมาตรฐานคุณภาพน้ำโดยรอบ

การคำนวณหาค่าร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์ (Water footprint of a product)

ร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์ หมายถึงปริมาณน้ำทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ทั้งทางตรง และทางอ้อม โดยพิจารณาทั้งน้ำใช้และน้ำเสียที่เกิดขึ้นในทุกขั้นตอนของสายการผลิต การคำนวณร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์การคำนวณร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้ 2 วิธี คือ

1. การคำนวณร่องรอยการใช้น้ำวิธีการรวมสายโซ่ (chain-summation approach) ใช้ในกรณีที่ระบบการผลิตนั้นผลิตออกมาเพียงผลิตภัณฑ์เดียวเท่านั้นซึ่งง่ายกว่าวิธีการแบบขั้นตอนสะสมและสามารถคำนวณค่าออกมาได้โดยใช้สมการที่ (1)

$$WF_{prod}[p] = \frac{\sum_{s=1}^{k} WF_{proc}[s]}{P[p]} \qquad (1)$$

โดยที่ $WF_{prod}[p]$ คือ การประเมินค่าร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์ (ปริมาตรต่อน้ำหนัก)

$WF_{prod}[s]$ คือค่าร่องรอยการใช้น้ำของขั้นตอนย่อย s

$P[p]$ คือปริมาณการผลิตของผลิตภัณฑ์

2. การคำนวณร่องรอยการใช้น้ำวิธีการแบบขั้นตอนสะสม (step-wise accumulative approach) คือ การคำนวณร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์โดยการรวมค่าร่องรอยการใช้น้ำของวัตถุดิบทรัพยากร และผลิตภัณฑ์ขาเข้าที่เป็นปัจจัยสำคัญในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์นั้นๆโดยใช้สมการที่ (2) - (4)

$$WF_{prod}[p] = \left(WF_{proc}[p] + \sum_{i=1}^{y} \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p,i]}\right) \times f_v[p] \quad (2)$$

$$f_p[p,i] = \frac{w[p]}{w[i]} \quad (3)$$

$$f_v[p] = \frac{price[p] \times w[p]}{\sum_{p=1}^{z}(price[p] \times w[p])} \quad (4)$$

โดยที่ $WF_{prod}[p]$ คือ การประเมินค่าร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์ (ปริมาตรต่อน้ำหนัก)

$WF_{prod}[i]$ คือ การประเมินค่าร่องรอยการใช้น้ำวัตถุดิบขาเข้า i

$WF_{proc}[p]$ คือ การประเมินค่าร่องรอยการใช้น้ำ ของกระบวนการแปรรูปจากวัตถุดิบเป็นผลิตภัณฑ์ (ปริมาณต่อน้ำหนัก)

$f_p[p,i]$ คือ ผลิตภาพของผลิตภัณฑ์

$f_v[p]$ คือ ผลิตภาพของมูลค่าของผลิตภัณฑ์

$w[p]$ คือ ปริมาณผลิตภัณฑ์ขาออก

$w[i]$ คือ ปริมาณผลิตภัณฑ์ขาเข้า

price [p] คือ ราคาของผลิตภัณฑ์

รูปแบบการคำนวณขั้นตอนสะสมของผลิตภัณฑ์สามารถเขียนเป็นอีกรูปแบบในกรณีที่ผลิตภัณฑ์เข้าสู่กระบวนการผลิต และได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเพียงผลิตภัณฑ์เดียวเขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$WF_{prod}[p] = WF_{proc}[p] + \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p,i]} \quad (5)$$

การศึกษาร่องรอยการใช้น้ำของผลิตภัณฑ์อาจไม่ได้นับรวมน้ำสีเทาเนื่องจากน้ำทิ้งมีคุณภาพน้ำเท่ากับหรือดีกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งเป็นผลสืบเนื่องจากเทคโนโลยีสะอาดในกระบวนการผลิตหรืออาจมาจากการขาดข้อมูลในระดับโลกจาก 2 ส่วน คือ ค่าคุณภาพน้ำทิ้ง และปริมาณของน้ำที่ได้รับผลกระทบที่ไม่สามารถวัดได้จึงทำให้ไม่มีข้อมูลของน้ำสีเทา (Van Oel, P.R. and Hoekstra, A.Y., 2010)

ผลและวิจัยผลการทดลอง

ในขั้นตอนการคำนวณร่องรอยการใช้น้ำแบบวิธีการรวมสายโซ่เมื่อการจัดทำบัญชีรายการปริมาณทรัพยากรของแต่ละกระบวนการมีขั้นการคำนวณได้ดังนี้

การคำนวณค่าร่องรอยการใช้น้ำในแต่ละช่วงวัฏจักรนั้นใช้หลักการหาปริมาณต่อผลิตภัณฑ์ (ปริมาณ/หน่วย) คูณกับค่าสัมประสิทธิ์ร่องรอยการกาใช้น้ำ (Emission Factor) ซึ่งจะแสดงให้ดูส่วนของค่าร่องรอยการใช้น้ำในวัฏจักรชีวิตของการได้มาซึ่งวัตถุดิบในส่วนของวัตถุดิบ

ข้อมูลการคำนวณ ดังนี้

ปริมาณต่อผลิตภัณฑ์ของวัตถุดิบสับปะรด	11.2429	กิโลกรัม
ค่าสัมประสิทธิ์ร่องรอยการกาใช้น้ำสีเขียว	0.2150	ลูกบาศก์เมตรน้ำ / หน่วย
การปันส่วน (%)	3.6467	เปอร์เซ็นต์
ผลคูณน้ำสีเขียว 11.2429 x 0.2150 x 3.6467 =	0.0823	ลูกบาศก์เมตรน้ำ.

ซึ่งการคำนวณน้ำสีฟ้า และน้ำสีเทาใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกันกับการคำนวณน้ำสีเขียวแสดงผลดัง (Table 1)

การคำนวณค่าร่องรอยการใช้น้ำในวัฏจักรชีวิตของการได้มาซึ่งวัตถุดิบในส่วนของการขนส่งใช้หลักการหาปริมาณต่อผลิตภัณฑ์คูณกับค่าสัมประสิทธิ์ร่องรอยการใช้น้ำของน้ำสีฟ้าซึ่งจะแสดงให้ดูส่วนของค่าร่องรอยการใช้น้ำในวัฏจักรชีวิตของการได้มาซึ่งวัตถุดิบในส่วนของขนส่งขาไป และขากลับดังสมาการที่ (6) และ (7)

$$\text{ภาระขาไป} = \frac{\text{ปริมาณต่อผลิตภัณฑ์ x ระยะทาง}}{1{,}000} \quad (6)$$

$$\text{ภาระขากลับ} = \frac{\text{ปริมาณต่อผลิตภัณฑ์ x ระยะทาง}}{\text{น้ำหนักบรรทุกหน่วยกิโลกรัม}} \quad (7)$$

ปริมาณต่อผลิตภัณฑ์ของวัตถุดิบสับปะรด	11.2429	กิโลกรัม
ระยะทาง	21.1300	กิโลเมตร

รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ น้ำหนักรถ 7,000 กิโลกรัม

$$\text{ภาระขาไป} = \frac{11.2429 \times 21.1300}{1{,}000} = 0.237563 \text{ ตันกิโลเมตร}$$

$$\text{ภาระขากลับ} = \frac{11.2429 \times 21.1300}{7{,}000} = 0.033938 \text{ ตันกิโลเมตร}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ร่องรอยการกาใช้น้ำสีฟ้าเที่ยวไป	0.00009155	ลูกบาศก์เมตรน้ำ / หน่วย
ค่าค่าสัมประสิทธิ์ร่องรอยการกาใช้น้ำสีฟ้าเที่ยวกลับ	0.00020320	ลูกบาศก์เมตรน้ำ / หน่วย

ผลคูณน้ำสีฟ้าเที่ยวไป = 0.237563 x 0.00009155

= 0.00002175 ลูกบาศก์เมตรน้ำ

ผลคูณน้ำสีฟ้าเที่ยวกลับ = 0.033938 x 0.00020320

= 0.00000688 ลูกบาศก์เมตรน้ำ

ดังนั้นเมื่อรวมค่าผลคูณการขนส่ง = ผลคูณน้ำสีฟ้าเที่ยวไป + ผลคูณน้ำสีฟ้าเที่ยวกลับ

= 0.00002175 + 0.00000688

= 0.00002863 ลูกบาศก์เมตรน้ำ

Table 1 Water footprint raw materials sourcing of a canned pineapple in syrup: 20 oz. net weighted 567 grams

Raw material	LCI		Emission Factor (m^3 H_2O eq./ Unit)				Rationing (%)	Multiple (m^3 H_2O eq.)				Proportion (%)
	Unit	Quantity / FU	Green Water	Blue Water	Gray Water	Total		Green Water	Blue Water	Gray Water	Total	
Pineapple	kg	11.2429	0.22	0.01	0.03	0.26	3.64	0.09	0.00	0.01	0.10	55.01
Canned	kg	0.0775	0.00	0.61	0.00	0.61	100.00	0.00	0.05	0.00	0.05	25.04
Syrup	kg	0.1570	0.14	0.02	0.02	0.18	100.00	0.02	0.00	0.00	0.03	14.69
Cover	kg	0.0130	0.00	0.71	0.00	0.71	100.00	0.00	0.01	0.00	0.01	4.89
shrink wrap	kg	0.0165	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Epoxy resin	kg	0.0003	0.00	0.02	0.00	0.02	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Label (paper)	kg	0.0028	0.00	0.07	0.00	0.07	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
Glue (UV)	kg	0.0002	0.00	0.02	0.00	0.02	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boxes	kg	0.0104	0.00	0.04	0.00	0.04	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
Total								0.11	0.06	0.02	0.19	100.00%

Table 2 Water footprint of a canned pineapple in syrup: 20 oz. net weighted 567 grams

Life Cycle Assessment	Total (L H_2O eq.)			Total	Proportion (%)
	Green Water	Blue Water	Gray Water		
Material	109.63	64.74	15.70	190.07	91.49
Production	0.00	15.15	2.53	17.68	8.51
Total	109.63	79.89	18.23	207.75	100.00

โดยค่าการประเมินร่องรอยการใช้น้ำของการได้มาซึ่งวัตถุดิบ 190.07 ลิตรน้ำต่อกระป๋อง คิดเป็นร้อยละ 91.49 จากค่าประเมินร่องรอยการใช้น้ำทั้งหมดโดยผลกระทบส่วนใหญ่มาจากการได้มาซึ่งสับปะรด และการผลิต 17.68 ลิตรน้ำต่อกระป๋อง คิดเป็นร้อยละ 8.51 ซึ่งค่าจากการประเมินวัฏจักรชีวิตของสับปะรดบรรจุกระป๋องในน้ำเชื่อม ขนาด 20 ออนซ์ น้ำหนักสุทธิ 267 กรัม หน่วยหน้าที่เพื่อการบริโภค 1 กระป๋องเท่ากับ 207.75 ลิตรน้ำต่อกระป๋อง

โดยค่าการประเมินรองร่อยการใช้น้ำของการได้มาซึ่งวัตถุดิบ 2,131.34 ลิตรน้ำต่อกระป๋อง คิดเป็นร้อยละ 98.48 จากค่าประเมินร่องรอยการใช้น้ำทั้งหมดโดยผลกระทบส่วนใหญ่มาจากการได้มาซึ่งสับปะรด และการผลิต 32.90 ลิตรน้ำต่อกระป๋อง คิดเป็นร้อยละ 1.52 จากค่าประเมินร่องรอยการใช้น้ำทั้งหมดพบว่าในกระบวนการผลิตใน

ขั้นตอนการล้างสับปะรดมีการใช้น้ำปริมาณมากซึ่งค่าจากการประเมินวัฏจักรชีวิตของสับปะรดบรรจุกระป๋องในน้ำสับปะรด หน่วยหน้าที่เพื่อการบริโภค 1 กระป๋อง เท่ากับ 2,164.24 ลิตรน้ำต่อกระป๋อง

โดยค่าการประเมินร่องรอยการใช้น้ำของการได้มาซึ่งวัตถุดิบ 79,620.45 ลิตรน้ำต่อกระป๋อง คิดเป็นร้อยละ 66.64 จากค่าประเมินร่องรอยการใช้น้ำทั้งหมดโดยผลกระทบส่วนใหญ่มาจากการได้มาซึ่งสับปะรด และการผลิต 39,857.03 ลิตรน้ำต่อกระป๋อง คิดเป็นร้อยละ 33.36 จากค่าประเมินร่องรอยการใช้น้ำทั้งหมดพบว่าในกระบวนการผลิตในขั้นตอนการฆ่าเชื้อมีการใช้น้ำปริมาณมากซึ่งค่าจากการประเมินวัฏจักรชีวิตของและน้ำสับปะรดเข้มข้นบรรจุถัง น้ำหนัก 263 กิโลกรัม หน่วยหน้าที่เพื่อการบริโภค 1 ถัง เท่ากับ 119,477.48 ลิตรน้ำต่อถัง

สรุป

จากผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ประเภท ทำให้ทราบปริมาณน้ำ และทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิต และค่าที่ได้เป็นตัวชี้วัดมาตรฐานการดำเนินงานของอุตสาหกรรมถึงผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของกลุ่มผลิตภัณฑ์เดียวกัน และเพื่อปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดปริมาณทรัพยากรที่ใช้เกินความจำเป็น โดยการเสนอให้นำน้ำคอนเดนเสทจากการผลิตไอน้ำในการไล่อากาศ การเติมน้ำเชื่อม และการฆ่าเชื้อกลับมาใช้ใหม่โดยมีการปรับคุณภาพน้ำให้ได้มาตรฐานก่อนนำกลับไปใช้ในหม้อไอน้ำหรือก่อนใช้ในขั้นตอนการล้างสับปะรดก่อนเข้าสู่กระบวนการเพื่อช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการแข่งขันสู่ตลาดโลก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ประกอบการกลุ่มอุตสาหกรรมสับปะรด จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดระยอง จังหวัดชลบุรี ในการสนับสนุนข้อมูลของงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2557. **ระบบแสดงข้อมูลด้านสถิติ**. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/oae_report/export_import, 15 กันยายน 2558.

Hoekstra, A.Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya, and M.M. Mesfin, 2011.**The water footprint assessment manual: Setting the global standard**. Earthscan, London.

Van Oel, P.R., and A.Y. Hoekstra. 2010. **The green and blue water footprint of paper products: methodological considerations and quantification**: Value of water research report series No. 46, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.

การทดสอบกำลังเฉือนระหว่างดินกับใยสังเคราะห์ในสภาวะอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

Shear strength of soils with geotextiles test in saturated and unsaturated conditions

ณัฐพัชร์ ฤกษ์ชัยศรี[1*] และ อภินิติ โชติสังกาศ[1]

Natthapat Rurgchaisri[1*] and Apiniti Jotisankasa[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับวัสดุใยสังเคราะห์ในสภาวะที่ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ และวัดศักย์แรงดูดของน้ำในดิน โดยการทดสอบจะใช้ดินสามชนิดซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานที่แตกต่างกันบดอัดที่ที่ความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์และเสริมใยสังเคราะห์ ในการเฉือนโดยที่กำหนดน้ำหนักประสิทธิผล ที่หน่วยแรงตั้งฉาก 31.5, 63, 126 kPa และกำหนดค่าความชื้นของดินที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับแผ่นใยสังเคราะห์แบบอิ่มตัวด้วยน้ำ ผลที่ได้พบว่าได้ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือน c' และ φ' ดิน SC ML CH ทั้งแบบดินโดยตรง และเฉือนกับใยสังเคราะห์ ให้ค่า φ' ที่ใกล้เคียงกัน จะแตกต่างกันเพียงค่า c' เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของวัสดุ PEC ในการเพิ่มแรงเสียดทาน และ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับแผ่นใยสังเคราะห์แบบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่าค่ามุม φ^b มีค่าน้อย (< 4 องศา) สำหรับดินเหนียวและดินทรายแป้ง กำลังแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสดินกับวัสดุใยสังเคราะห์ มีค่าที่ไม่ขึ้นกับความชื้นมากนัก แสดงว่ากำลังเสียดทานระหว่างผิวมีค่าลดลงเมื่อดินแห้งขึ้น

ABSTRACT

This article presents the shear strength of three main types of soils (SC, ML and CH) and interface friction between the three soils with PEC geotextiles. The tests were conducted in both fully saturated and unsaturated soils incorporating soil suction measuring devices. All soils were compacted at 90% compaction and optimum moisture content and tested at the normal stresses of 31.5, 63, 126 kPa. Different tests were conducted at different moisture contents.

The test result shows that the value of φ' for SC ML and CH soils are similar to the interface friction parameters between the soil and PEC with only some difference in the value of c'. This demonstrate the efficiency of the PEC composite geotextile. From the unsaturated tests on interface friction, it was found that the angle φ^b is relatively low (< 4 degree) for clayey and silty soils, suggesting the interface friction is not very dependent on moisture conditions for the two materials. However, for sandy soil, the angle φ^b b can be negative which suggests that the interface friction become lower as the sand gets drier.

Key Words: Geotextiles, Unsaturated Soils, Loading, Shear Strength, Soil Suction Measuring Devices

[*]Corresponding author; e-mail address: **hellbear.pmee@gmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาดินถล่มและการกัดเซาะหน้าดินเป็นปัญหาที่ก่อให้เกิดความสูญเสียแก่ชีวิตและทรัพย์สิน และยังเกิดขึ้นบ่อยและรุนแรงขึ้น เนื่องจาการแปรปรวนของสภาพอากาศ เกิดจากฝนตกหนัก หรือฤดูแล้งยาวนาน จึงทำให้เกิดปัญหาดินถล่ม และทรุดตัวเนื่องจากน้ำแล้ง ซึ่งพบเห็นได้บ่อยครั้ง การปรับปรุงเสถียรภาพของลาดดินนั้นมีหลากหลายวิธี อาทิ โครงสร้างกำแพงกันดิน การใช้วัสดุสังเคราะห์เสริมแรง ในการศึกษานี้เน้นการเสริมแรงด้วย วัสดุใยสังเคราะห์ (Geotextile) เนื่องจากเป็นวิธีซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและนำไปประยุกต์กับการปลูกพืชร่วมได้ (อภินิติ, 2556) โดยประสิทธิภาพของวัสดุเสริมแรงจะขึ้นกับปัจจัยหลากหลาย อาทิ คุณสมบัติของดินแต่ละชนิด ความชื้นซึ่งขึ้นกับปริมาณน้ำฝนในระดับต่างๆ ปริมาณน้ำฝนนับเป็นตัวแปรสำคัญทำให้ ความชื้นและแรงดันน้ำช่องว่างดินเพิ่มขึ้น โดยเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดดินถล่ม พฤติกรรมของน้ำฝนและดินต่างชนิดกันจะให้ผลที่แตกต่างกัน

การศึกษานี้เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินสามชนิดหลัก ได้แก่ ดินทราย ดินทรายแป้ง และดินเหนียว ซึ่งเสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ โดยทดสอบกำลังระหว่างผิววัสดุ (Interface friction) ของดินซึ่งบดอัดที่ความหนาแน่น 90 เปอร์เซ็นต์ ของการบดอัดมาตรฐาน โดยมีตัวแปรสำคัญคือ แรงดูดเมทริกซ์ หรือสภาวะความชื้นในดินที่แตกต่างกัน และน้ำหนักกดทับ ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้ออกแบบลาดเสริมแรงด้วยวัสดุสังเคราะห์ PEC (Geosynthetic Reinforced Slope) ที่สภาวะความชื้นต่างๆ ได้

อุปกรณ์และวิธีการ

คุณสมบัติของดิน

Soil Properties

Table 1 Soil Type and properties

Soil Type (USCS)	LL (%)	PI (%)	Gs	Maximum Dry Density (t/m^2)	Optimum Water Content (%)
SC	31.21	11.76	2.69	1.79	15.45
ML	39.26	29.40	2.65	1.67	18.9
CH	56.9	28.39	2.69	1.43	28.09

SC = Bannathum Soil. Thautae, Kanchanadit ,Suratthani

ML = Maepoon Soil. Maepoon, Lublae, Uttaradit

CH = Sena Soil. Rangjorrake, sena, Pranakorn si ayutthaya

แผ่นใยสังเคราะห์

แผ่นใยสังเคราะห์ชนิด Geotextile ชนิด Non woven เสริมแรงด้วยเส้นใย polyester เพื่อให้สามารถรับแรงดึงได้มากขึ้น โดยวัสดุที่ใช้เป็นรุ่น TENCATE PEC75

ใช้รูปแบบการถักทอเป็นแผ่นใยสังเคราะห์เพื่อช่วยในการเสริมกำลังของดิน

Table 2 Rock PEC – Geotextiles Technical Data

Properties (Standard)		Unit	PEC 75
Mechanical Properties			
Tensile strength (EN ISO 10319)	MD&CD	kN/m	79
Elongation at nominal strength (EN ISO 10319)	MD&CD	%	10
Tensile Strength at			
2%	MD&CD	kN/m	16
3%	MD&CD	kN/m	22
5% (EN ISO 10319)	MD&CD	kN/m	37

MD = machine direction / CD = cross direction

For information concerning long term design strength, friction behavior



Figure 1 GeotextilesTENCATEPEC75

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนดินโดยตรงและทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับวัสดุใยสังเคราะห์แบบอิ่มตัวด้วยน้ำ

เป็นการทดสอบในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและหน่วยแรงประสิทธิผล ทดสอบตัวอย่าง 6 รูปแบบ คือ กำลังของดินเปล่า 3 ชนิด SC ML และ CH และ กำลังระหว่างวัสดุเสริมใยสังเคราะห์ PEC กับดิน SC ML และ CH ซึ่งบดอัดที่ความหนาแน่น 90% Standard compaction สภาวะการทดสอบเป็นแบบระบายน้ำ (Single stage drained test) อัตราเร็วในการเฉือนตัวอย่างเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบที่หน่วยน้ำหนัก 31.5 kPa 63.0 kPa และ 126.0 kPa ตามลำดับทำให้ได้พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดิน (c',φ ') ดังสมการที่ (1)

$$\boldsymbol{\tau = c' + (\sigma - u)tan\varphi'} \quad (1)$$

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนดินโดยตรงและทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับวัสดุใยสังเคราะห์แบบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

เป็นการทดสอบดินในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน หน่วยแรงรวมและหน่วยแรงดูด โดยใช้แบบจำลองของ Fredlund & Rahardjo, 1993, ทดสอบตัวอย่าง 6 รูปแบบ คือ กำลังของดินเปล่า 3 ชนิด SC ML และ CH และ กำลังระหว่างวัสดุ เสริมใยสังเคราะห์ PEC กับดิน SC ML และ CH ซึ่งบดอัดที่ความหนาแน่น 90% Standard compaction และให้ค่าความชื้นที่แตกต่างกัน จากนั้นนำตัวอย่างดินตัวอย่างมาทดสอบโดยทำการติด KU-Tensiometer เพื่อวัดแรงดูดขณะทำการเฉือนตัวอย่างดินตามวิธีของ Jotisankasa and Mairaing (2010) โดยที่ทำการทดสอบเป็นแบบความชื้นคงที่ (Single stage constant water content shearing test) ในอัตราความเร็วในการเฉือนตัวอย่างดินที่ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที ที่หน่วยน้ำหนัก 31.5 kPa 63.0 kPa และ 126.0 kPa ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ $\boldsymbol{\varphi^b}$ ดังสมการที่ (2)

$$\tau = c + \sigma_n \tan\varphi - u_w \tan\varphi^b \quad (2)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนดินโดยตรงและทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับวัสดุใยสังเคราะห์แบบอิ่มตัวด้วยน้ำ

จากผลทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ ดิน SC ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดินมีค่าเท่ากับ 33.89 kPa 45.08 kPa และ 80.51 kPa ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลเท่ากับ 31.5 kPa 63.0 kPa และ 126.0 kPa เมื่อเฉือนดินตัวอย่างนี้แบบอิ่มตัวด้วยน้ำดินมีพฤติกรรมที่บวมและยุบตัวลง เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยน้ำหนักประสิทธิผลมาหาพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนพบว่าดินตัวอย่างมีค่า c' เท่ากับ 16.18 kPa และ **φ'** เท่ากับ 26.72 องศา (Figure 2)

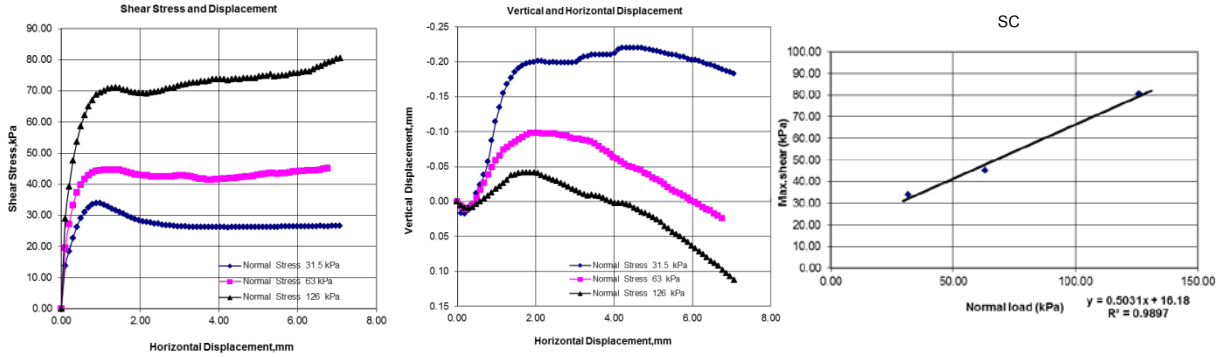


Figure 2 2a) Shear stress and displacement SC. 2b) Vertical and horizontal displacement SC.

2c) Mohr-coulomb failure envelope for SC saturated soil.

จากผลทดสอบ ดิน ML ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดินมีค่าเท่ากับ 24.12 kPa 36.08 kPa และ 73.59 kPa ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลเท่ากับ 31.5 kPa 63.0 kPa และ 126.0 kPa เมื่อเฉือนดินตัวอย่างนี้แบบอิ่มตัวด้วยน้ำดินมีพฤติกรรมที่บวมและยุบตัวลง เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยน้ำหนักประสิทธิผลมาหาพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนพบว่าดินตัวอย่างมีค่า c' เท่ากับ 5.37 kPa และ **φ'** เท่ากับ 28.1 องศา (Figure 3)

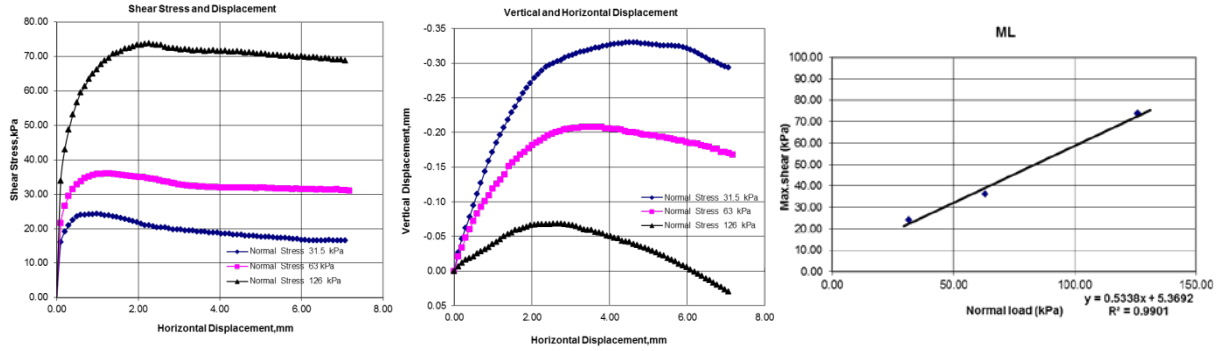


Figure 3 3a)Shear stress and displacement ML . 3b)Vertical and horizontal displacement ML.

3c) Mohr-coulomb failure envelope for ML saturated soil.

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ ดิน CH ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดินมีค่าเท่ากับ 22.89 kPa 44.11 kPa และ 73.84 kPa ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลเท่ากับ 31.5 kPa 63.0 kPa และ 126.0 kPa เมื่อเฉือนดินตัวอย่างนี้แบบอิ่มตัวด้วยน้ำดินมีพฤติกรรมที่บวมและยุบตัวลง เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยน้ำหนักประสิทธิผลมาหาพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนพบว่าดินตัวอย่างมีค่า c' เท่ากับ 8.0 kPa และ **φ'** เท่ากับ 27.92 องศา (Figure 4)

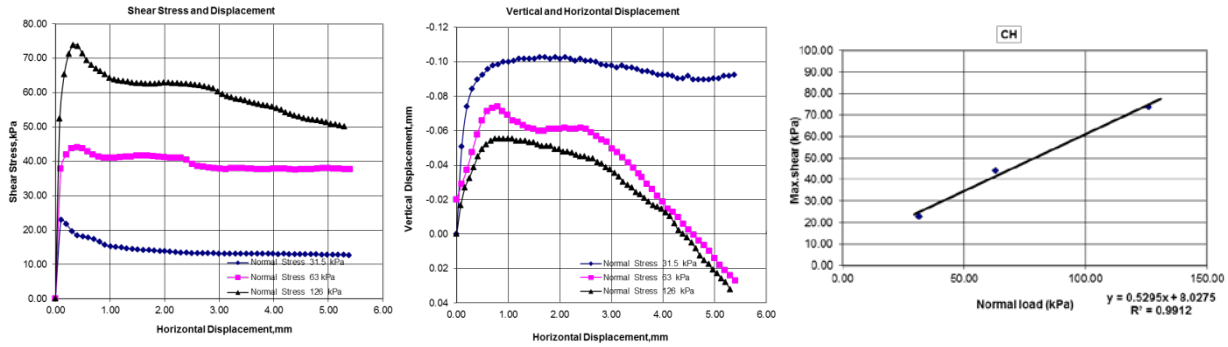


Figure 4 4a) Shear stress and displacement CH. 4b) Vertical and horizontal displacement CH. 4c) Mohr-coulomb failure envelope for CH saturated soil.

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างผิว Interface friction ของ ดิน SC กับวัสดุใยสังเคราะห์ ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดินมีค่าเท่ากับ 26.21 kPa 46.29 kPa และ 73.41 kPa ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลเท่ากับ 31.5 kPa 63.0 kPa และ 126.0 kPa เมื่อเฉือนดินตัวอย่างนี้แบบอิ่มตัวด้วยน้ำดินมีพฤติกรรมที่ยุบและบวมตัวขึ้น เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยน้ำหนักประสิทธิผลมาหาพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนพบว่าดินตัวอย่างมีค่า c' เท่ากับ 12.65 kPa และ **φ'** เท่ากับ 26.07 องศา (Figure 5)

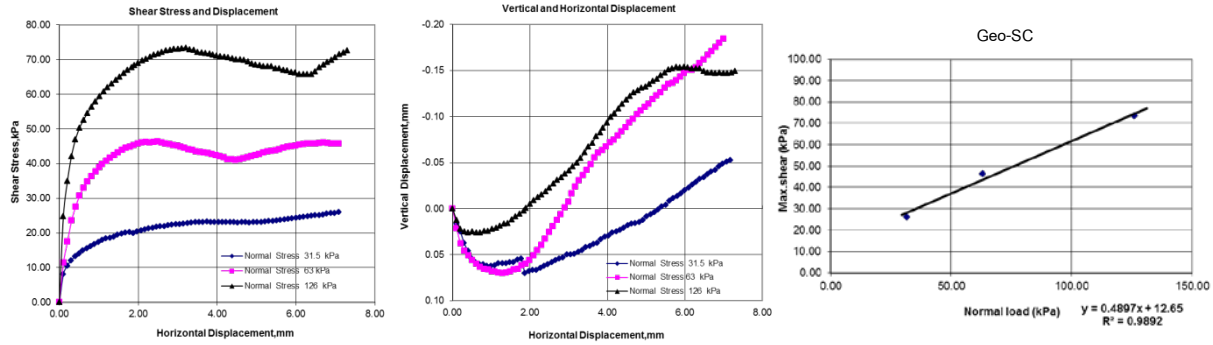


Figure 5 5a)Shear stress and displacement SC – Geotextiles.5b) Vertical and horizontal displacement SC– Geotextiles. 5c) Mohr-coulomb failure envelope for SC – Geotextiles saturated soil.

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างผิว Interface friction ของ ดิน ML กับวัสดุใยสังเคราะห์ ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดินมีค่าเท่ากับ 24.82 kPa 38.97 kPa และ 73.41 kPa ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลเท่ากับ 31.5 kPa 63.0 kPa และ 126.0 kPa เมื่อเฉือนดินตัวอย่างนี้แบบอิ่มตัวด้วยน้ำดินมีพฤติกรรมที่ยุบตัวลง เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยน้ำหนักประสิทธิผลมาหาพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนพบว่าดินตัวอย่างมีค่า c' เท่ากับ 7.6 kPa และ **φ'** เท่ากับ 27.43 องศา (Figure 6)

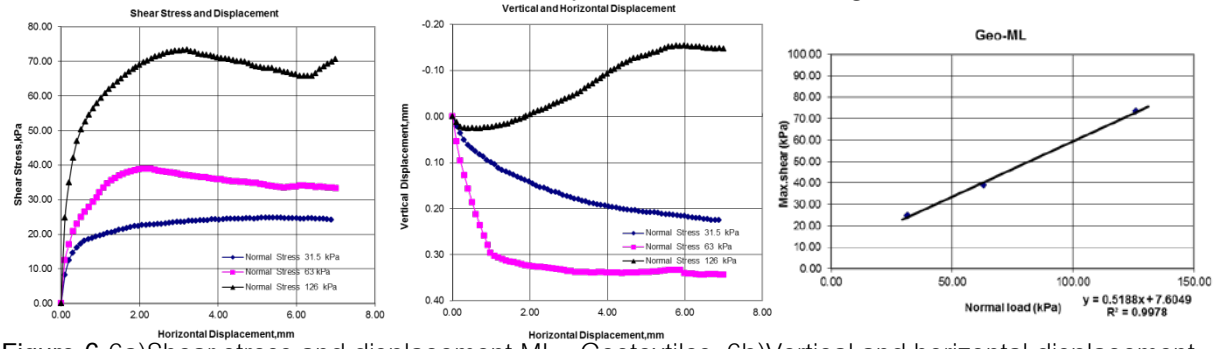


Figure 6 6a)Shear stress and displacement ML - Geotextiles .6b)Vertical and horizontal displacement ML - Geotextiles. 6c) Mohr-coulomb failure envelope for ML - Geotextiles saturated soil.

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างผิว Interface friction ของ ดิน CH กับวัสดุใยสังเคราะห์ ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดินมีค่าเท่ากับ 20.74 kPa 44.09 kPa และ 73.41 kPa ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลเท่ากับ 31.5 kPa 63.0 kPa และ 126.0 kPa เมื่อเฉือนดินตัวอย่างนี้แบบอิ่มตัวด้วยน้ำดินมีพฤติกรรมที่บวมตัวขึ้น เมื่อนำค่ากำลังรับแรงเฉือนกับหน่วยน้ำหนักประสิทธิผลมาหาพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนพบว่าดินตัวอย่างมีค่า c' เท่ากับ 6.1 kPa และ φ' เท่ากับ 28.56 องศา (Figure 7)

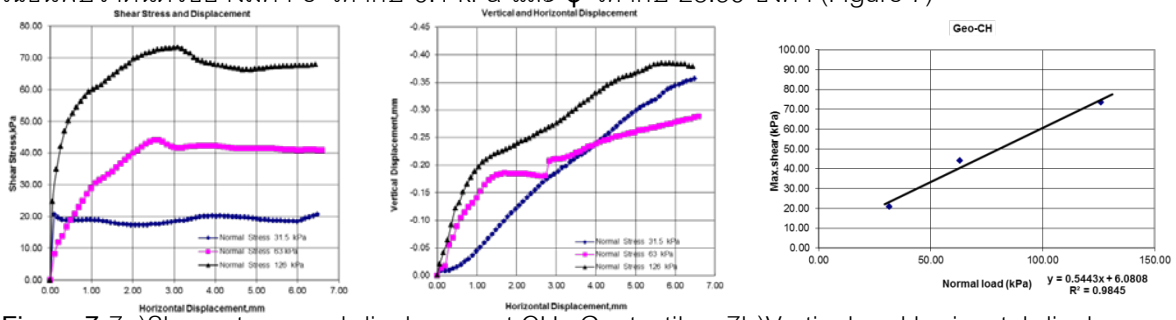


Figure 7 7a)Shear stress and displacement CH– Geotextiles .7b)Vertical and horizontal displacement CH – Geotextiles. 7c) Mohr-coulomb failure envelope for CH– Geotextiles saturated soil.

ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนดินโดยตรงและทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับวัสดุใยสังเคราะห์แบบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ ดิน SC ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดิน ที่หน่วยน้ำหนักที่ 31.5 kPa มีค่า $\boldsymbol{\varphi^b}$ เท่ากับ 17.41และที่ 126.0 kPa มีค่า $\boldsymbol{\varphi^b}$ เท่ากับ 31.21 (Figure 8) เนื่องจากผลการทดสอบที่หน่วยน้ำหนัก 63.0 kPa มีความไม่แน่นอนจึงไม่สามารถคำนวณค่า $\boldsymbol{\varphi^b}$ได้

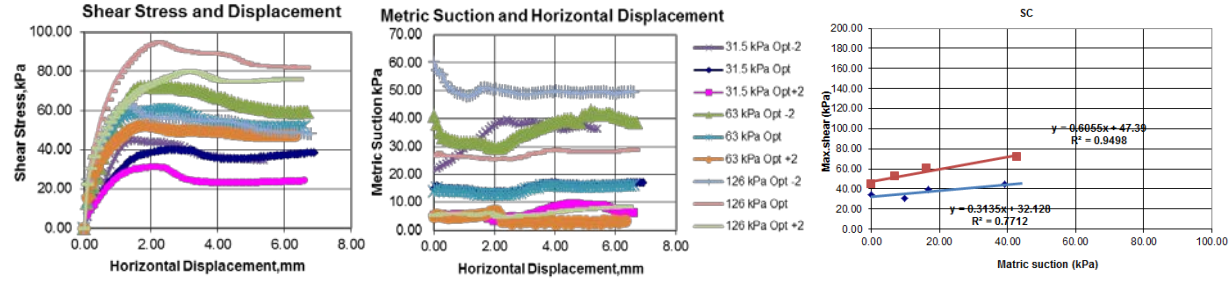


Figure 8 8a)Shear stress and displacement SC. 8b)Metric suction and horizontal displacement SC. 8c) Mohr-coulomb failure envelope for SC unsaturated soil.

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ ดิน ML ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดิน ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลที่ 31.5 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 46.22 ที่ 63.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 44.19 และที่ 126.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 35.86 (Figure 9) อย่างไรก็ดีเนื่องจากในการทดสอบนี้มีการปรับความชื้นไม่ครบทุดช่วง จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนได้

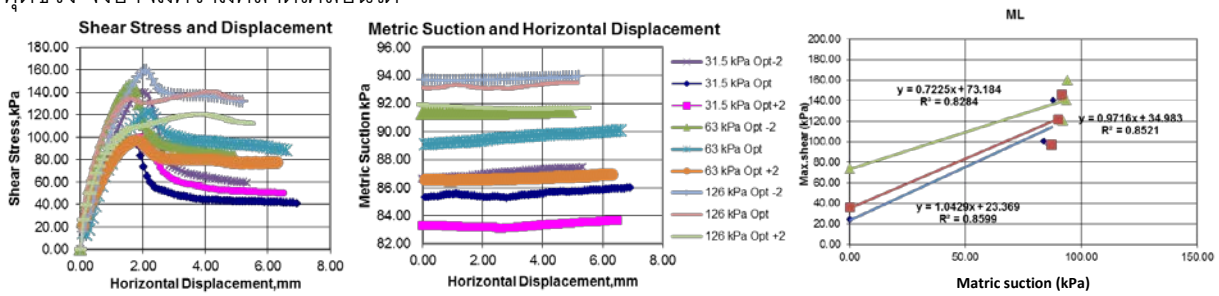


Figure 9 9a)Shear stress and displacement ML. 9b)Metric suction and horizontal displacement ML. 9c) Mohr-coulomb failure envelope for ML unsaturated soil.

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ ดิน CH ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดิน ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลที่ 31.5 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 47.94 ที่ 63.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 44.6 และที่ 126.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 45.02 (Figure 10)

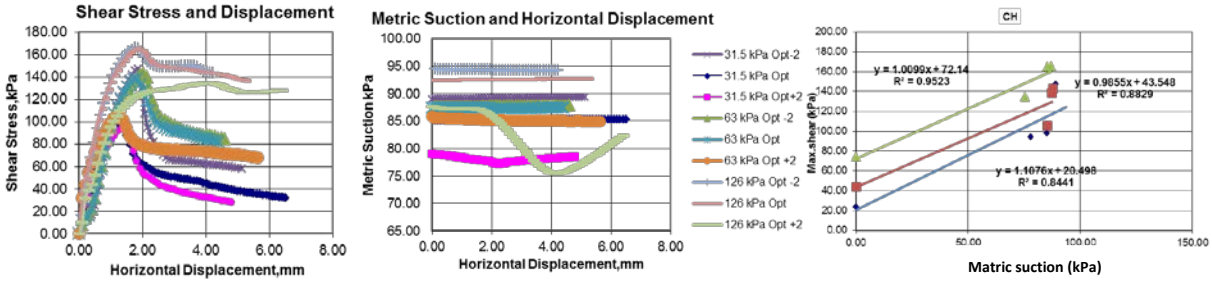


Figure 10 10a)Shear stress and displacement CH.10b)Metric suction and horizontal displacement CH.10c) Mohr-coulomb failure envelope for CH unsaturated soil.

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างผิว Interface frictionของ ดิน SC กับวัสดุใยสังเคราะห์ ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดิน ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลที่ 31.5 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 10.46 ที่ 63.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 6.6และที่ 126.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 10.09 (Figure 11)

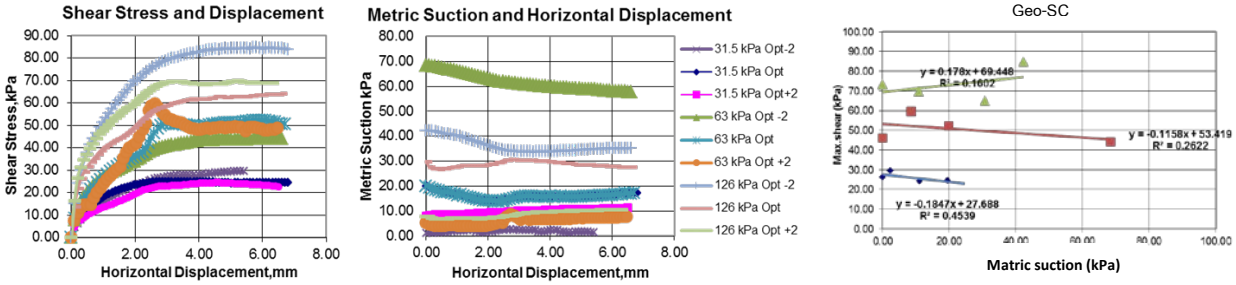


Figure 11 11a)Shear stress and displacement SC – Geotextiles. 11b)Metric suction and horizontal displacement SC – Geotextiles. 11c) Mohr- coulomb failure envelope for SC – Geotextiles unsaturated soil.

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างผิว Interface friction ของ ดิน ML กับวัสดุใยสังเคราะห์ ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดิน ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลที่ 31.5 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 0.96 ที่ 63.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 2.53 และที่ 126.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 3.56 (Figure 12)

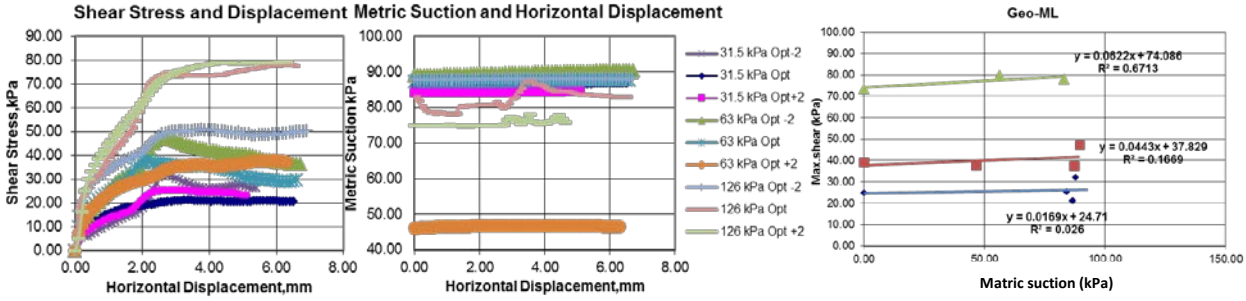


Figure 12 12a)Shear stress and displacement ML – Geotextiles. 12b)Metric suction and horizontal displacement ML- Geotextiles. 12c) Mohr-coulomb failure envelope for ML – Geotextiles unsaturated soil.

จากทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างผิว Interface friction ของ ดิน CH กับวัสดุใยสังเคราะห์ ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ากำลังรับแรงเฉือนดิน ที่หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลที่ 31.5 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 4.29 ที่ 63.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 0.04 และที่ 126.0 kPa มีค่า φ^b เท่ากับ 3.40 (Figure 13)

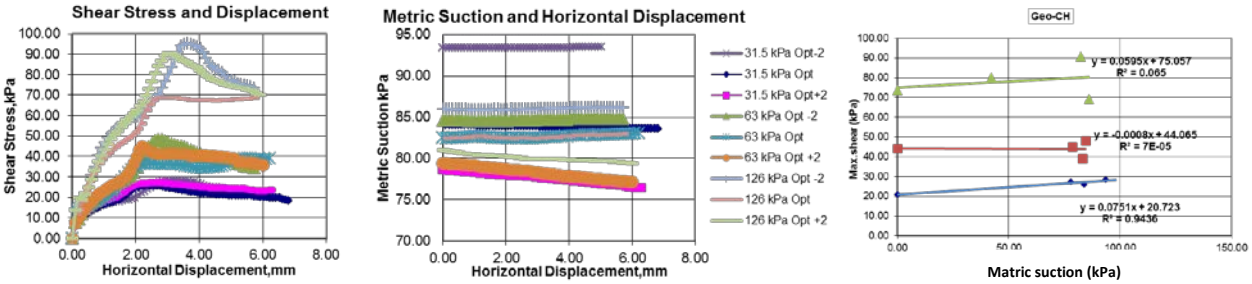


Figure 13 13a)Shear stress and displacement CH– Geotextiles. 13b)Metric suction and horizontal displacement CH – Geotextiles. 13c) Mohr-coulomb failure envelope for CH–Geotextiles unsaturated soil.

สรุป

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับแผ่นใยสังเคราะห์แบบอิ่มตัวด้วยน้ำ ผลที่ได้พบว่าได้ค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือน c' และ φ' ดิน SC ML CH ทั้งแบบดินโดยตรง และเฉือนกับใยสังเคราะห์ ให้ค่า φ' ที่ใกล้เคียงกัน จะแตกต่างกันเพียงค่า c' เพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของวัสดุ PEC ในการเพิ่มแรงเสียดทาน และ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินกับแผ่นใยสังเคราะห์แบบไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่าค่ามุม φ^b มีค่าน้อย (< 4 องศา) ซึ่งแสดงว่า สำหรับดินเหนียวและดินทรายแป้ง กำลังแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสดินกับวัสดุใยสังเคราะห์ มีค่าที่ไม่ขึ้นกับความชื้นมากนัก และสอดคล้องกับงานวิจัยโดย Esmaili และคณะ ในกรณีดินทรายพบว่ามุม φ^b มีค่าติดลบ แสดงว่า กำลังเสียดทานระหว่างผิวมีค่าลดลงเมื่อดินแห้งขึ้น อาจเกิดจากเมื่อเม็ดดินทรายและใยสังเคราะห์แห้งขึ้น ปริมาณน้ำในช่องว่างลดลง ทำให้มีความยึดเกาะ (Adhesion)น้อยลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมูลนิธิชัยพัฒนา บริษัท Tencate และชาวบ้านในพื้นที่บ้านหน้าถ้ำ,ชาวบ้านในพื้นที่แม่พูล และพื้นที่รางจรเข้ ที่ให้ความช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อสถานที่เก็บตัวอย่างดินและวัสดุ

เอกสารอ้างอิง

อภินิติ โชติสังกาศ, 2556.ชีววิศวกรรมปฐพี เพื่อควบคุมการชะล้างพังทลายของลาดและดินถล่ม

Danial Esmaili , Kianoosh Hatami , Gerald A. Miller. 2014. Influence of matric suction on geotextile reinforcement-marginal soil interface strength. Geotextiles and Geomembranes 42 (2014)

Fredlund & Rahardjo, 1993, Soil Mechanics for Unsaturated Soils

Jotisankasa, A. and W.Mairaing. (2010). Suction-monitored direct shear testing of residual soils from landslide-prone areas Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 136 (3) March 1, 2010

การตรวจหาการดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนและการวางแผนบำรุงรักษา

Determination of PD Occurrence in Combustion Type Turbine Generator and Maintenance Planning

ถิรวุฒิ วงศ์สาลี[1*] ธงชัย นิวิฐจรรยงค์[1*] และ วินัย พฤกษะวัน[1]

Tirawut Wongsalee[1*],Thongchai Nivitchanyong[1*]and Winai Plueksawan[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจหาการดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนด้วยวิธีการตรวจจับโดยใช้เซ็นเซอร์ที่ตรวจจับคลื่นเสียงและกระแสความถี่สูงที่เกิดจากการดีสชาร์จตามวิธีของIEEE std.C57.127-2007 วิธีนี้สามารถระบุตำแหน่งการเกิดดีสชาร์จได้อย่างแม่นยำและยังสามารถระบุความรุนแรงของดีสชาร์จที่เกิดขึ้นได้อีกด้วยจากกรณีศึกษาที่ได้ทำการตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นพบว่าดีสชาร์จบริเวณส่วนเกิดขึ้นที่ขดลวดของสเตเตอร์เส้นที่ 27และมีความรุนแรงอยู่ในระดับ small PD ขั้นตอนต่อมาคือการวางแผนในการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมในแต่ละกรณีจะขึ้นอยู่กับลักษณะและความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นว่ามีความมากน้อยเพียงใดเพื่อทำการซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้กลับมาใช้งานได้ดีดังเดิม

ABSTRACT

This paper presents a method used to detect partial discharge activity in the stator winding of a combustion turbine type generator using acoustic emission and High Frequency current detection techniques according to IEEE std.C57.127-2007, Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges. This method can locate the partial discharge source precisely and also determine the criticality level of the particular source. For our case study, a partial discharge source was detected at the left of drive end of stator winding number 27 with a gap time of 9.4 millisecond, which was considered to be small PD. A planning chart is prepared to dismantle the generator to inspect for abnormality and performs necessary corrective actions to restore the generator to its normal usage.

Key Words: partial discharge, stator winding, generator

* Corresponding author; e-mail address: tnivitchanyong@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัญหาของระบบฉนวนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของฉนวนของขดลวดสเตเตอร์นั้น มีผลกระทบในระยะสั้นหรือระยะยาวต่อการทำงานในสภาวะปกติ จะขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุที่ใช้ผลิตกระบวนการกรรมวิธีในการผลิตและเคลื่อนย้าย หรือแม้กระทั่งการติดตั้ง หรือสภาพแวดล้อมของสถานที่ในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและปริมาณภาระทางไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของการใช้งาน ทุกปัจจัยที่ได้กล่าวมาล้วนมีผลต่อระบบฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามักเกิดขึ้นบริเวณขดลวดสเตเตอร์ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงที่มีการดัดงอทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงในบริเวณดังกล่าว ดังนั้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงต้องได้รับการตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนในทุกๆปีเป็นระยะๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการประเมินดัชนีสุขภาพและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเพื่อวางแผนบำรุงรักษาฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ตามมาตรฐานของ IEC และ IEEE

ในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่ได้นำมาเป็นกรณีศึกษา เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด68.125 MW ซึ่งสงสัยว่ามีดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น โรงไฟฟ้าได้มีการใช้วิธีการตรวจหาดีสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตรวจหาด้วยเสียงและกระแสความถี่สูงที่เกิดขึ้นจากการดีสชาร์จโดยมีหลักการดังนี้เสียงความถี่สูงที่ปลดปล่อยออกมาจากจุดกำเนิดดีสชาร์จในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกตรวจจับโดยเซ็นเซอร์ตรวจจับเสียงความถี่สูง(HF acoustic sensor)จำนวน 4 เซ็นเซอร์ การที่เซ็นเซอร์จะได้รับสัญญาณเสียงมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์แต่ละตัวกับตำแหน่งของการเกิดดีสชาร์จ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะและขนาดของสัญญาณที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ทั้ง 4 เซ็นเซอร์ก็จะสามารถทราบตำแหน่งของดีสชาร์จที่เกิดขึ้นได้สัญญาณที่ตรวจจับได้นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ความรุนแรงของดีสชาร์จที่เกิดขึ้น เมื่อทราบถึงลักษณะความเสียหายบริเวณตำแหน่งที่เกิดการดีสชาร์จ จะเป็นข้อมูลเพื่อวางแผนวิธีการและระยะเวลาในการแก้ไขและซ่อมแซม เพื่อป้องกันความเสียหายในระยะยาวที่อาจจะเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจหาการดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน

ในการตรวจวัดการดีสชาร์จที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้ใช้อุปกรณ์ในการตรวจวัดดังนี้ เซ็นเซอร์ตรวจจับสัญญาณเสียงความถี่สูง(HF acoustic sensor)ซึ่งจะตรวจจับความถี่เสียงในย่านความถี่ 80 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 300 กิโลเฮิรตซ์จำนวน 4 เซ็นเซอร์



Figure 1 Acoustic sensor

เซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสความถี่สูง(HF Current Transducer) ในย่านความถี่100 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 30 เมกกะเฮิรตซ์ จำนวน 1เซ็นเซอร์



Figure 2 High Frequency Current Transducer

เครื่องรับสัญญาณเสียงความถี่สูงจากและสัญญาณกระแสความถี่สูง(PD-TM500A)จากเซ็นเซอร์ทั้ง 5 ตัว จะแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นข้อมูลเพื่อจัดเก็บและแสดงผล และนอกจากนี้ ยังต้องมีคอมพิวเตอร์เพื่อใช้แสดงผลและบันทึกข้อมูล 1 เครื่อง



Figure 3 Data acquisition unit

วิธีการตรวจหาการเกิดดีสชาร์จด้วยการตรวจจับสัญญาณเสียง

หลักการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงความถี่สูงที่เกิดขึ้นจากดีสชาร์จบางส่วนได้ถูกนำมาใช้จะเป็นแนวทางในการศึกษาปัญหาการดีสชาร์จบางส่วนพร้อมทั้งวิธีการแก้ไขและทดสอบที่เป็นเสมือนตัวบ่งชี้สุขภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนโดยเน้นการศึกษาปัญหาที่ส่วนประกอบที่เป็นระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าวิธีการตรวจหาดีสชาร์จที่บางส่วนเกิดขึ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีดังนี้

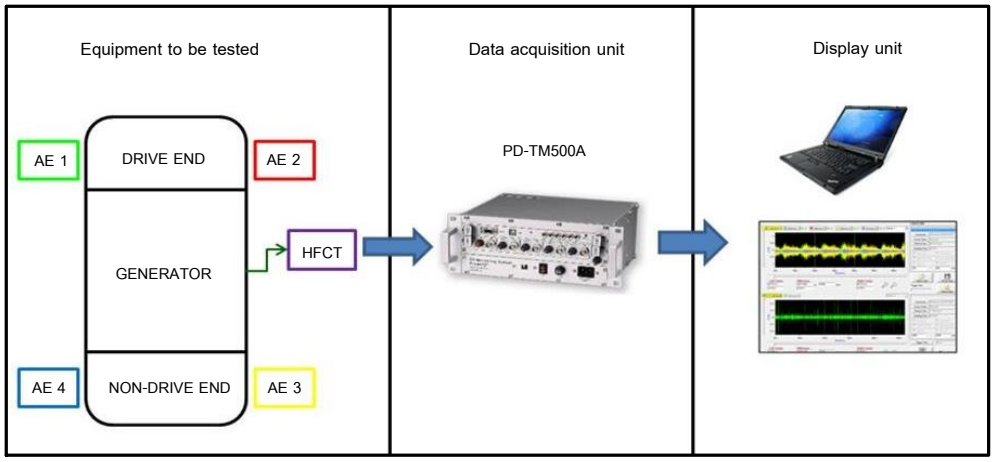


Figure 5 Method of signals detection by AE sensor and HFCT

ส่วนประกอบหลักของ Main body of Generator จะประกอบไปด้วยโรเตอร์และสเตเตอร์ขั้นตอนแรกของการปฏิบัติคือต้องระบุตำแหน่งที่จะติดตั้งเซ็นเซอร์ โดยจะแบ่งทิศทางการติดตั้งออกเป็น 2 ทิศทาง คือด้านที่ติดกับอุปกรณ์ขับเคลื่อน (DE) และด้านที่ไม่ติดกับอุปกรณ์ขับเคลื่อน (NDE) โดยจะมีเซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นเสียงความถี่สูงจำนวน 4 เซ็นเซอร์ การติดตั้งนั้นจะต้องครอบคลุมทั้งหมด โดยจะเริ่มติดตั้ง เซ็นเซอร์จากทางด้านที่ติดกับอุปกรณ์ขับเคลื่อน โดยพื้นที่ ที่สามารถติดตั้งได้จะมีสอง ด้านคือด้านข้างซ้ายและขวาของระหว่าง DN และ NDN ซึ่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ในแต่ละด้านนั้นจะติดตั้งด้านละ 2 เซ็นเซอร์บริเวณใกล้ขอบทั้ง 2 ข้างของ DN และ NDN ซึ่งจะแสดงการติดตั้งเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 5และติดตั้ง เซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสความถี่สูง (HFCT sensor)ที่บริเวณระบบกราวด์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ขั้นตอนในการตรวจหาตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

การติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับเสียงความถี่สูงและเซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสความถี่สูงจะทำให้ทราบตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนว่าอยู่ในด้านใดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขั้นตอนของการระบุตำแหน่งที่เกิดขึ้นของดีสชาร์จบางส่วนแบ่งได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

1) **ตรวจสอบหาตำแหน่งของดิสชาร์จในแนวนอน**

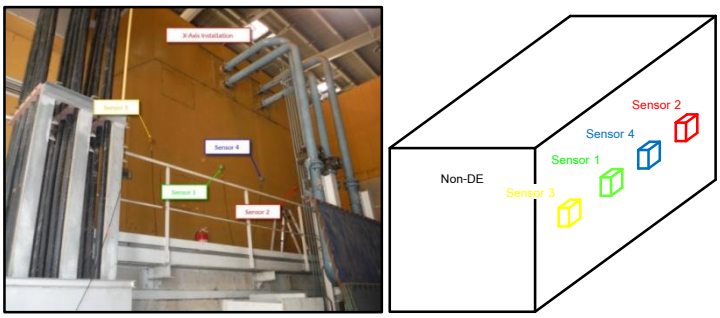


Figure 5 Acoustic Sensors installation in X-Axis.

สัญญาณที่ตรวจจับได้โดย เซ็นเซอร์ตรวจจับเสียงความถี่สูงทั้ง 4 เซ็นเซอร์ จะมีขนาดของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณที่ได้รับนี้แต่ละเซ็นเซอร์ สัญญาณที่มีขนาดที่สูงสุดจะถูกพิจารณาให้เป็นตำแหน่งใกล้ที่สุดของการเกิดดิสชาร์จ เซ็นเซอร์จะถูกนำมาเรียงในแนวแกนนอน เพื่อตรวจจับสัญญาณเสียงจากดีสชาร์จ ถ้าเซ็นเซอร์ตรวจจับเสียงความถี่สูงตัวใดรับสัญญาณที่มีขนาดสูงที่สุดจะสันนิฐานว่าตำแหน่งของเซ็นเซอร์ตัวนั้นเป็นตำแหน่งใกล้สุดของการเกิดดิสชาร์จและต้องทำการตรวจสอบอีกครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าสมมติฐานนั้นถูกต้องโดยการ ตรวจสอบหาตำแหน่งในแนวแกนตั้งต่อไป

2) **ตรวจสอบหาตำแหน่งของดิสชาร์จในแนวตั้ง**

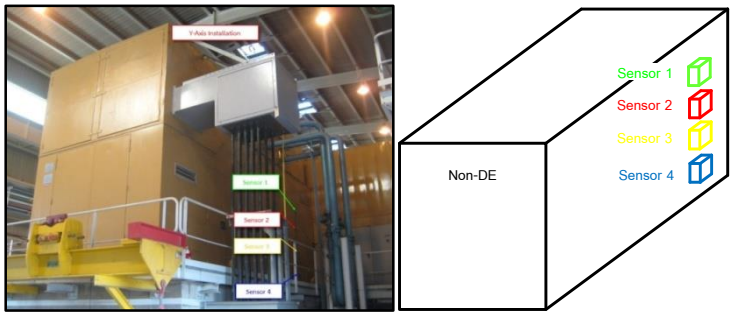


Figure 6 Acoustic Sensors installation in Y-Axis.

เมื่อสันนิษฐานตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จในแนวแกนนอนเรียบร้อยแล้ว ต่อมาจะเป็นการตรวจหาตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จในแนวแกนตั้งโดยตรวจสอบจากขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงที่ เซ็นเซอร์ตรวจจับเสียงความถี่สูงทั้ง 4 เซ็นเซอร์ ถ้าเซ็นเซอร์ตรวจจับเสียงความถี่สูงตัวใดรับสัญญาณที่มีขนาดสูงที่สุด จะสันนิฐานว่าตำแหน่งของเซ็นเซอร์ตัวนั้นเป็นตำแหน่งใกล้สุดของดิสชาร์จที่เกิดขึ้น

3) **การตรวจหาตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จ**

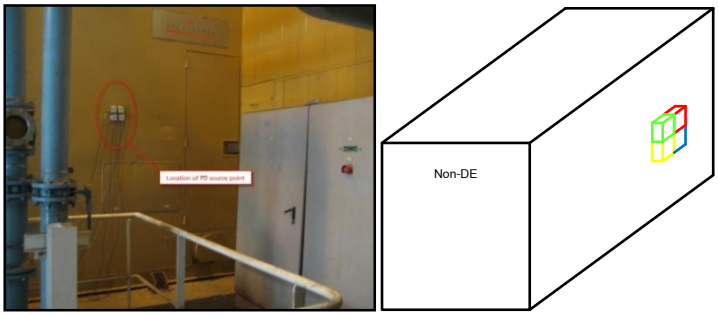


Figure 7 Acoustic Sensors installation at location of partial discharge source.

จากสองขั้นตอนแรกของการตรวจหาตำแหน่ง จะทำให้ได้สมมติฐานของตำแหน่งดิสชาร์จ และในขั้นตอนสุดท้ายนี้จะยืนยันตำแหน่งแท้จริงของดีสชาร์จบางส่วนโดย จะนำเซ็นเซอร์ทั้งหมดไปติดตั้งบริเวณตำแหน่งที่สันนิษฐานไว้เพื่อรับสัญญาณจากตำแหน่งนั้น ในขั้นตอนสุดท้ายของการตรวจหาตำแหน่งของดีสชาร์จ ถ้าจุดนั้นเป็นจุดที่เกิดการดิสชาร์จขึ้นตามที่คาดการไว้สัญญาณเสียงที่ได้รับมานั้นจะมีลักษณะ และขนาดที่ใกล้เคียงกัน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการตรวจหาตำแหน่งและขนาดดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน

ดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นกับขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแบ่งตามตำแหน่งที่เกิดได้ 3 ลักษณะคือ การดีสชาร์จเกิดขึ้นบริเวณช่องบรรจุขดลวด(slot portion)การดีสชาร์จซึ่งเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างส่วนที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกับส่วนที่เป็นกราวด์ และการดีสชาร์จซึ่งเกิดขึ้นบริเวณปลายขดลวด(coil end)และ jumperการเกิดดีสชาร์จทั้งสามชนิดนั้นเมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดคุณลักษณะ ต่างๆ คือ มีพัลส์ของคลื่นเสียงและกระแสความถี่สูงเกิดกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านความถี่สูง เกิดเรืองแสงเนื่องจากเกิดไอออไนเซชันเป็นโคโรนา เกิดความดันก๊าซเพิ่มสูงขึ้น เกิดความร้อน เกิดปฏิกิริยาทางเคมีในการนำเสนอกรรมวิธีในการตรวจหาการดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจะอาศัยหลักการตรวจจับพัลส์ของคลื่นเสียงและกระแสความถี่สูงพัลส์ของคลื่นเสียงความถี่สูงที่เกิดขึ้นจากการเกิดดีสชาร์จจะเกิดขึ้นที่ค่าสูงสุดของทุกช่วงคลื่น 50 เฮิรตซ์ตลอดเวลาด้วยแรงดันไฟฟ้าโดยตำแหน่งของพัลส์จะเกิดขึ้นที่ใกล้ค่ายอดของครึ่งช่วงคลื่นบวกและครึ่งช่วงคลื่นลบของคลื่นไซน์50 เฮิรตซ์

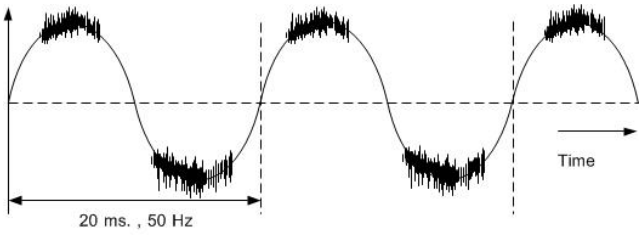


Figure 8 Partial Discharge signal.

ชนิดของการเกิดดีสชาร์จ และเส้นทางในการเดินทางของเสียงตามหลักการเดินทางของเสียง พัลส์คลื่นเสียงที่เกิดขึ้นสามารถตรวจจับด้วยเซ็นเซอร์ตรวจจับเสียงความถี่สูงพัลส์ของกระแสความถี่สูงที่เกิดขึ้นเนื่องจากดีส-ชาร์จโดยพฤติกรรมเมื่อเกิดการรั่วไหลของกระแสภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสที่เกิดขึ้นจะไหลไปยังเส้นทางที่มีความต่างศักย์ต่ำ นั่นก็คือระบบกราวน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใกล้ที่สุด ด้วยหลักการนี้จึงสามารถตรวจจับกระแสพัลส์ได้ที่บริเวณของระบบกราวน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสความถี่สูง (HFCT)ตำแหน่งคลื่นพัลส์เสียงและกระแสความถี่สูงบนช่วงคลื่นของไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่ใกล้กับบริเวณของยอดช่วงคลื่นลบและยอดช่วงคลื่นบวก

จากกรณีศึกษาตรวจหาดีสชาร์จในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนขนาด 68.125 เมกกะวัตต์ สัญญาณที่ได้รับจะมีสองคุณลักษณะคือ พัลส์สัญญาณเสียงความถี่สูง และพัลส์กระแสความถี่สูงบนความถี่50 เฮิรตซ์ระยะคาบหนึ่งช่วงคลื่นคือ20 มิลลิวินาที ลักษณะของพัลส์สัญญาณเสียงและกระแสความถี่สูงเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเฉลี่ยใกล้เคียง(ระยะห่างของพัลส์สัญญาณเสียงความถี่สูง 2 พัลส์) และสอดคล้องบนระยะคาบของ

คลื่นไซน์และมีลักษณะและช่วงความถี่ที่ใกล้เคียงกัน ค่า gap time ของการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นบริเวณด้าน left of drive end ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่า9.4 มิลลิวินาที

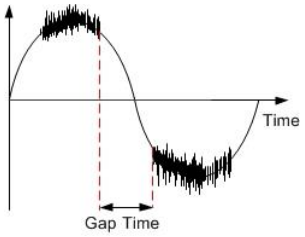


Figure 9 Gap time of Partial Discharge signal.

ระดับค่าความรุนแรงของการเกิดดีสชาร์จ(the interval time between 2 burst criteria) และแนวทางการป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า มีดังนี้

- ค่า gap time > 7ms เรียกว่า Small PD Level คำแนะนำ ควรที่จะทำการตรวจวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนแบบออนไลน์อย่างต่อเนื่อง ทุกๆ 6-12 เดือน เพื่อสังเกตแนวโน้มการเกิดดีชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์

- ค่า 3 ms< Gap time < 7ms เรียกว่า Major PD Level คำแนะนำ ควรที่จะดูแลเอาใจใส่อุปกรณ์อย่างมาก และควรที่จะทำการตรวจวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนแบบออนไลน์อย่างต่อเนื่อง ทุกๆ 1-3 เดือน เพื่อสังเกตแนวโน้มการเกิดดีชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์

- ค่า Gap time < 3ms เรียกว่า Serious PD Level คำแนะนำ อุปกรณ์ที่ทำการตรวจวัดค่ามีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายอย่างสูงมาก ควรที่จะวางแผน Shut Down ระบบ หรืออุปกรณ์ เพื่อทำการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมอุปกรณ์นั้นๆ อย่างเร่งด่วน

ซึ่งกรณีศึกษา วัดได้Gap time อยู่ในช่วงของความรุนแรงที่เรียกว่า “small PD”ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังคงสามารถทำงานต่อไปได้อีกระยะหนึ่ง(ประมาณ9เดือน)บริเวณขดลวดที่เกิดดีสชาร์จคือ ส่วนโค้งของ ripple spring ที่มีช่องว่างระหว่าง ripple spring และliner ที่กดทับอยู่บนขดลวดสเตเตอร์ เนื่องจากมีช่องว่างที่ทำให้เกิดความเครียดทางไฟฟ้าเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมในช่องว่างซึ่งมีอากาศเป็นฉนวนดังนั้นหลังจากที่ได้ตรวจพบสัญญาณของดิสชาร์จบริเวณของ left of drive end ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อถึงกำหนดที่ต้องทำการบำรุงรักษา จึงได้ทำการหยุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบบริเวณที่ตรวจพบดีสชาร์จบางส่วน โดยการถอดประกอบ พบว่าบริเวณของขดลวดสเตเตอร์นั้นมีลักษณะภาพรวมปกติ แต่เนื่องจากสัญญาณที่ตรวจพบ ได้ระบุตำแหน่งการเกิดขึ้นไว้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงได้มีการเซาะบริเวณร่องของขดลวดของแกนเหล็กช่องที่ 27 อย่างละเอียดจึงพบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับripple spring และ liner



Figure 10 The effect of partial discharge is occur at stator coils.



Figure 11 Damage of partial discharge on ripple spring and liner.

เนื่องจากความเสียหายเกิดขึ้นที่บริเวณบางส่วนของ ripple spring การแก้ไขสามารถทำได้ด้วยการเปลี่ยน ripple spring และ linerส่วนที่ได้รับความเสียหายบริเวณของขดลวดที่ได้รับความเสียหายจะต้องทำความสะอาดผงแป้งที่เกิดจากดีสชาร์จก่อนใช้กาว(epoxy)และน้ำยาวานิช(red vanish)เพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนทาไปยังขดลวดเส้นที่ได้รับความเสียหาย และอบฉนวนให้แห้ง ก่อนที่จะทำการประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าด้วยกันและทดสอบเพื่อตรวจสอบสภาพความสมบูรณ์เพื่อให้ใช้งานได้ตามปกติ

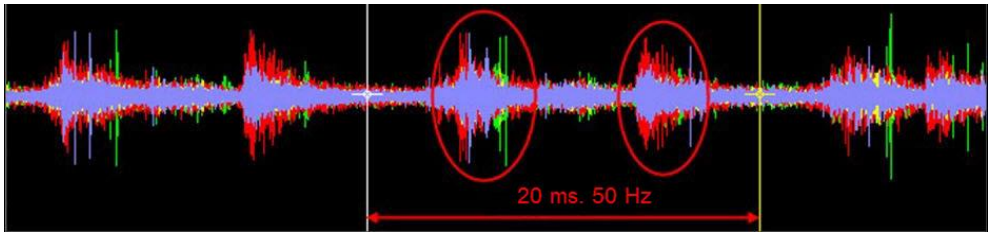


Figure 12 The acoustic signals of partial discharge source inside the generator.

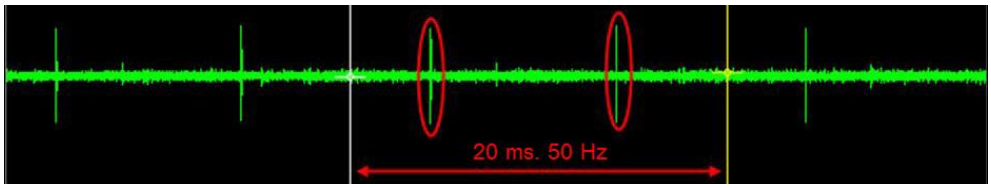


Figure 13 The current signal of partial discharge source inside the generator.

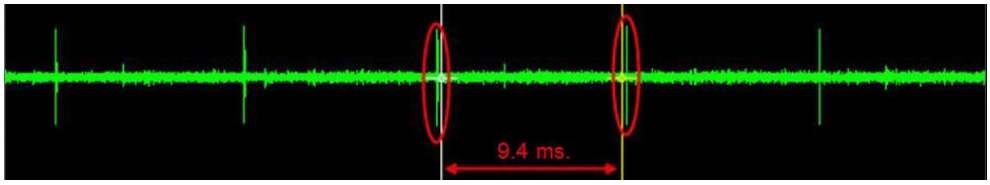


Figure 14 The Gap time of partial discharge source inside the generator.

สรุป

วิธีการตรวจหาการดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน ด้วยสัญญาณเสียงและกระแสความถี่สูง ในส่วนของขดลวดสเตเตอร์ สามารถใช้ตรวจหาและระบุตำแหน่งดีสชาร์จที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งสามารถระบุความรุนแรงที่เกิดขึ้น โดยจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นกรณีศึกษาจะพบว่าการดีสชาร์จบางส่วนเป็นการดีสชาร์จประเภทslot discharge เกิดขึ้นบริเวณช้ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าฝั่งที่ติดกับกังหันไอน้ำซึ่งตรงกับขดลวดที่ 27 ของขดลวดสเตเตอร์ ค่าของ Gap time คือ 9.4 มิลลิวินาที ความรุนแรงที่เกิดขึ้นจัดอยู่ในระดับเริ่มต้น small PDข้อแนะนำหลังจากการตรวจพบคือการทดสอบขดลวดสเตเตอร์ทั้ง 4 แบบคือ การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนขดลวดการทดสอบความต้านทานต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง การทดสอบหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด และการทดสอบหาค่าความจุไฟฟ้าของขดลวดทั้งก่อนและหลังซ่อมแซม เพื่อนำค่าทดสอบที่ได้มา

เปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นถึงสภาพของขดลวดที่ดีขึ้น และตรวจหาการดีสชาร์จบางส่วนซ้ำอีกครั้งบริเวณจุดเดิมที่ตรวจพบเพื่อเป็นการยืนยันว่าการดีสชาร์จได้รับการแก้ไขแล้วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจหาการเกิดดีสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีดั้งเดิมด้วยการการใช้คาปาซิเตอร์คาบเกี่ยว(coupling capacitor) ข้อดีก็คือวิธีตรวจจับสัญญาณเสียงไม่จำเป็นต้องหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพราะการติดตั้งเซ็นเซอร์จะติดตั้งบริเวณพื้นผิวภายนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสามารถระบุตำแหน่งและความรุนแรงของดีสชาร์จที่เกิดขึ้นจริง ส่วนข้อเสียคือการติดตั้งอุปกรณ์ในขณะเครื่องจักรทำงานต้องมีความระมัดระวังค่อนข้างสูงเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังทำงานอยู่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท แอดวานซ์ เพาเวอร์ อีควิปเมนท์ (ประเทศไทย) จำกัดสำหรับเครื่องมือในการตรวจวัดการดีสชาร์จในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

IEEE std.C57.127-2007Guide for the Detection andLocation of Acoustic Emissions fromPartial Discharges in Oil-ImmersedPower Transformers and Reactors.

Urairat Fuangsoongnern, Winai Plueksawan, Kittimasak Tikakosol 2014.**A measurement technique to identify and locate partial discharge in transformer with AE and HFCT. IEEE Innovative Smart Grid Technologies**,Asia (ISGT ASIA).

แผนกเครื่องผลิตและเครื่องจักรไฟฟ้า กองโรงงาน ฝ่ายบำรุงรักษา**เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการ**.Partial Discharge **การเกิด อันตราย การตรวจสอบและวิธีการวัดโดย** PDA.

IEEE std.43-1974 IEEE Standard Guide for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.

IEEE std.118-1978 .Standard Test Code for Resistance Measurement.

Mark William Fischer,Hans Diebacker,Harry L. Sill andPhilip M. Arbogast 2008. **Method and System for Ripple-Spring Compression Assessment.United States Patent.**, Orlando, FL (US),2008.

Thomas Baumann, Jorg Oesterheld and Roland Schuler2000.**Stator winding insulation.United States Patent.**, Zurich,Switzerland,2000.

F.T. Emery. 2010.**Fundamentals of Testing Mica Epoxy Stator Coils for High Voltage Electric Generators.IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.**, Charlotte, North Carolina,2010.

Greg C. Stone, Howard GandMichael J.1996.**Application of Partial Discharge Testing to Motor and Generator Stator Winding Maintenance.IEEE Transaction on Industry applications**.Costello,1996.

การศึกษาปัจจัยการแยกเนื้อน้อยหน่าโดยใช้วิธีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

Study on Parameters of Centrifugal Pulping Machine for Sugar Apple

สาทิป รัตนภาสกร และ สมัคร รักแม่[1]

Satip Rattanapaskorn[1] and Samak Rakmae[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยการแยกเนื้อน้อยหน่าโดยใช้วิธีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ซึ่งวิธีการนี้ช่วยลดเวลาในการแยกเนื้อน้อยหน่าออกจากเมล็ด เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องแยกเนื้อน้อยหน่า โดยใช้เครื่องแยกแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ทำการศึกษากับน้อยหน่าพันธุ์หนัง ปัจจัยที่ศึกษา คือ 1) ความเร็วรอบ คือ 2100 2400 2700 และ 3000 รอบต่อนาที และ 2) เวลาเหวี่ยงแยกเนื้อน้อยหน่า คือ 60 70 80 และ 90 วินาที และ 3) การเตรียมน้อยหน่าก่อนหมุนเหวี่ยง ด้วยการบีบนวดและการหั่นเป็นชิ้น จากการทดลองพบว่า ความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ในการเหวี่ยงแยกมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อร้อยละปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่เหวี่ยงแยกได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการเหวี่ยงแยก คือ ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที และที่เวลา 80 วินาที โดยน้อยหน่าที่ผ่านการบีบนวดแยกเนื้อน้อยหน่าได้ 87.00% และน้อยหน่าหั่นแว่นแยกเนื้อน้อยหน่าได้ 74.88%

ABSTRACT

The objective of this research was to investigate parameters of the seed separation process of sugar apple by the centrifugal force in order to increase the effectiveness by decrease its processing time and to improve the design of the centrifugal seed separation machine. The experimental parameters were varied in the following ways: 1) the machine was set to rotate at the following speed: 2100, 2400, 2700 and 3000 rpm, 2) the machine operated for the following time: 60, 70, 80 and 90 seconds and 3) the sugar apple preparation methods were kneading and slicing. The results showed that the effectiveness of the separation process increased with the increase in the rotational speed and the operating time. The optimum condition was found at the speed of 3000 rpm for 80 seconds. It indicated that the average separation yield of the kneaded sugar apple was 87.00% and the sliced sugar apple was 74.88%.

Key Words: sugar apple, seed separation, centrifugal

* Corresponding author; e-mail address: krsatip@kmitl.ac.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

คำนำ

น้อยหน่าเป็นผลไม้เขตร้อนร้อน มีแหล่งกำเนิดในเขตร้อนของทวีปอเมริกา ในวงศ์ Annonaceae (Campbell and Phillips, 1980) พบมากในแถบศูนย์สูตร สามารถจำแนกสายพันธุ์น้อยหน่าออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ น้อยหน่าพื้นเมืองหรือน้อยหน่าฝ้าย น้อยหน่าหนังหรือน้อยหน่าญวน น้อยหน่าลูกผสมหรืออะติมัวย่า และลูกผสมอื่น ๆ (เรืองศักดิ์ และ กวิศร์, 2553) ช่วงฤดูกาลของน้อยหน่าจะอยู่ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงกันยายน ข้อจำกัดที่สำคัญของน้อยหน่าคือ อายุการเก็บรักษาสั้นเพราะเมื่อน้อยหน่าสุกเปลือกกับเนื้อจะนิ่ม ช้ำแตกและเน่าเสียได้ง่าย การขนส่งและจัดเก็บต้องทำอย่างระมัดระวัง โดยทั่วไปผลน้อยหน่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-7 เซนติเมตร สูง 6-10 เซนติเมตร มีเมล็ดประมาณ 35-45 เมล็ดต่อผล โดยเมล็ดกว้าง 0.6-0.8 เซนติเมตร ยาว 1.5-2.0 เซนติเมตร ลักษณะทางกายภาพของน้อยหน่าแสดงใน Figure 1 (Pinto, 2005)

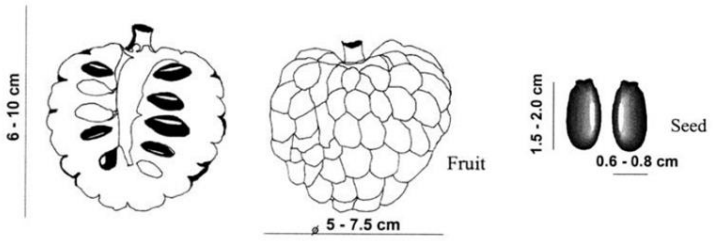


Figure 1 Characteristics of sugar apple (Pinto, 2005)

ในช่วงที่น้อยหน่ามีผลผลิตจำนวนมากน้อยหน่าจะมีราคาถูก เกษตรกรบางรายต้องปล่อยให้น้อยหน่าเน่าเสียคาต้นเนื่องจากน้อยหน่ามีราคาต่ำจนไม่คุ้มค่าจ้างแรงงานสำหรับเก็บผลผลิต ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มีผู้ประกอบการบางรายนำน้อยหน่ามาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ เช่น ไอศกรีมน้อยหน่า โยเกิร์ตน้อยหน่า หรือ น้ำน้อยหน่า เป็นต้น โดยจะทำการรับซื้อน้อยหน่าในช่วงที่มีราคาถูกแล้วนำมาแกะเนื้อน้อยหน่าและแยกเมล็ด เอาเนื้อน้อยหน่าบรรจุลงในถุงเก็บแช่แข็งไว้เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบต่อไป กระบวนการแยกเนื้อน้อยหน่าในปัจจุบันใช้คนงานบีบนวดแยกเนื้อน้อยหน่าให้ลอดผ่านผ้าขาวบางหรือมุ้งไนลอน หรือใช้มีดคว้านเมล็ดออก มีอัตราการผลิตต่ำ ใช้แรงงานจำนวนมาก มีการสูญเสียระหว่างการผลิตสูง และมีโอกาสปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้คุณภาพและอายุการเก็บรักษาสั้นลง ทำให้ผู้ประกอบการบางส่วนมีความต้องการเครื่องจักรที่สามารถแยกเนื้อน้อยหน่าได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

จากโจทย์ที่ได้รับจากภาคอุตสาหกรรม คณะผู้วิจัยได้พิจารณาว่าการเหวี่ยงแยกแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เป็นวิธีแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้แยกเนื้อน้อยหน่าได้ เนื่องจากเป็นเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและสามารถออกแบบขยายขนาดให้เป็นระบบทำงานต่อเนื่องได้ การแยกด้วยวิธีการนี้ใช้สำหรับแยกวัสดุด้วยสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน คือ ขนาด ความหนาแน่นและลักษณะของเนื้อผลไม้ เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะสร้างแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ให้กับวัสดุ ทำให้วัสดุที่เหลว นิ่มหรืออ่อนตัวถูกเหวี่ยงลอดผ่านช่องเปิด ขณะที่วัสดุที่มีความแข็งและมีขนาดใหญ่กว่าช่องเปิดจะไม่สามารถหลุดออกจากช่องเปิดนั้นได้ เครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Figure 2) มีส่วนประกอบหลัก คือ ตัวถังที่ทำหน้าที่รองรับชิ้นเนื้อที่ลอดผ่านช่องเปิดหรือรูตะแกรง มีช่องไหลออกของชิ้นเนื้อ ภายในมีกระบอกหมุนเหวี่ยงที่มีแกนต่อกับมอเตอร์ กระบอกหมุนเหวี่ยงจะมีช่องเปิดลักษณะคล้ายตะแกรง ทำหน้าที่หมุนเหวี่ยงแยกชิ้นเนื้อออกจากเมล็ด

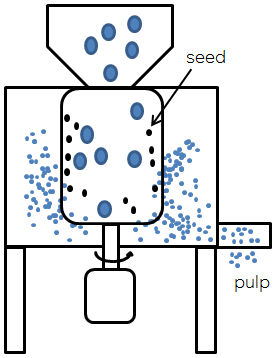


Figure 2 Principle of the centrifugal separation machine.

มีการประยุกต์ใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อใช้เหวี่ยงแยกเนื้อผลไม้กับส่วนที่ไม่ต้องการออกจากกันกับผลไม้หลายชนิด แต่จากการค้นคว้าพบว่ายังไม่พบว่ามีการศึกษาทดลองกับเนื้อน้อยหน่า โดยรัตนาพรและนงนุช (2553) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกเนื้อมังคุดแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ ทำการหาระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นที่ตัวถังกับตะแกรงทรงกระบอกให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเหวี่ยงแยกเนื้อมังคุดออกจากเมล็ด จากการทดสอบพบว่าที่ระยะห่าง 8 มิลลิเมตร สามารถแยกเนื้อมังคุดออกจากเมล็ดได้มากที่สุด 55.97% ขณะที่ธนพงษ์และสราญจิต (2553) ทำการศึกษาหาปัจจัยความเร็วรอบและเวลาที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเหวี่ยงแยกเนื้อของผลสำรอง ทดลองโดยใช้ความเร็วรอบ 4 ระดับ คือ 200 250 300 และ 350 รอบต่อนาที และเวลาแช่น้ำผลสำรอง 3 ระดับ ได้แก่ 60 70 และ 80 นาที จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบ 350 รอบต่อนาที และระยะเวลาการแช่ที่ 80 นาที มีผลต่อการเหวี่ยงแยกให้ได้ปริมาณเนื้อสำรองมากสุด นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของพงษ์มนัสและเอื้อ (2551) ได้ศึกษาปัจจัยในการเหวี่ยงแยกเนื้อสำรอง โดยต้องการลดปริมาณสิ่งเจือปนคือเศษเปลือกของผลสำรองที่ปนมาในเนื้อสำรองที่เหวี่ยงแยก พบว่าโดยที่ความเร็วรอบ 2800-3000 รอบต่อนาที และตะแกรงขนาด 25 เมส (mesh) มีปริมาณสิ่งเจือปนที่ปนมากับเนื้อสำรองน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังมีการใช้การเหวี่ยงหนีศูนย์แยกน้ำและเมล็ดเสาวรส คือสิทธาและคณะ (2551) ได้ศึกษาปัจจัยขนาดของมุมเอียงและเส้นผ่านศูนย์กลางรูตะแกรงของเครื่องเหวี่ยงแยกด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ พบว่ามุมเอียงที่ 72 องศา และขนาดรูตะแกรง 6 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมที่สุด

เครื่องเหวี่ยงแยกชิ้นเนื้อ ทำการแยกโดยใช้หลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ หมุนเหวี่ยงจนทำให้เนื้อที่มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำหลุดออกจากเมล็ด ลอดผ่านรูตะแกรง ขณะที่เมล็ดที่มีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงจะไม่สามารถลอดผ่านมาได้ ทำให้เกิดการแยกของส่วนเนื้อและเมล็ด งานวิจัยนี้จะใช้กระบอกเหวี่ยงแยกที่มีขนาดรูตะแกรง 5 มิลลิเมตร เนื่องจากเมล็ดน้อยหน่าซึ่งมีขนาด 6-8 มิลลิเมตร ส่วนเมล็ดหรือชิ้นส่วนที่ใหญ่กว่ารูตะแกรงจะอยู่บริเวณภายในทรงกระบอกเหวี่ยงแยก ซึ่งแรงหมุนเหวี่ยงที่กระทำกับชิ้นเนื้อเป็นตาม คือเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเหวี่ยงแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง มีความเป็นไปได้ในการนำมาเหวี่ยงแยกเนื้อน้อยหน่ากับเมล็ดออกจากกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อ ศึกษาปัจจัยการแยกเนื้อน้อยหน่าโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อนำข้อมูลมาพัฒนาสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกเนื้อน้อยหน่า และช่วยลดระยะเวลาในการแยกเนื้อน้อยหน่าในอุตสาหกรรมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบและอุปกรณ์

1. ผลน้อยหน่าพันธุ์หนังและพันธุ์ฝ้าย จากอำเภอปากช่อง จังหวัดโคราช
2. เครื่องเหวี่ยงแยกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ขนาด 0.5 แรงม้า กระบอกเหวี่ยงแยกสร้างจากสแตนเลส เส้นผ่านศูนย์กลาง 240 มิลลิเมตร สูง 160 มิลลิเมตร รูตะแกรง 5 มิลลิเมตร พื้นที่เปิดร้อยละ 46.28
3. อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบอินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ SUMITOMO รุ่น AF-500
4. นาฬิกาจับเวลา
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง

ขั้นตอนการทดลอง

น้อยหน่าที่มีความสุกระดับเหมาะสม คือ 110-120 วัน จะถูกนำมาปอกเปลือกด้วยมือและดึงแกนขั้วผลออก จากนั้นแบ่งน้อยหน่าเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 นำไปหั่นด้วยมีดตามแนวขวางของผลให้มีความหนาประมาณ 20 มิลลิเมตร ส่วนที่ 2 นำไปใส่ถุงพลาสติกแล้วกดให้แบนโดยวางแผ่นไม้บนถุงแล้วกดให้แบน 3-4 ครั้ง ลำดับการเตรียมเนื้อน้อยหน่าแสดงใน Figure 3

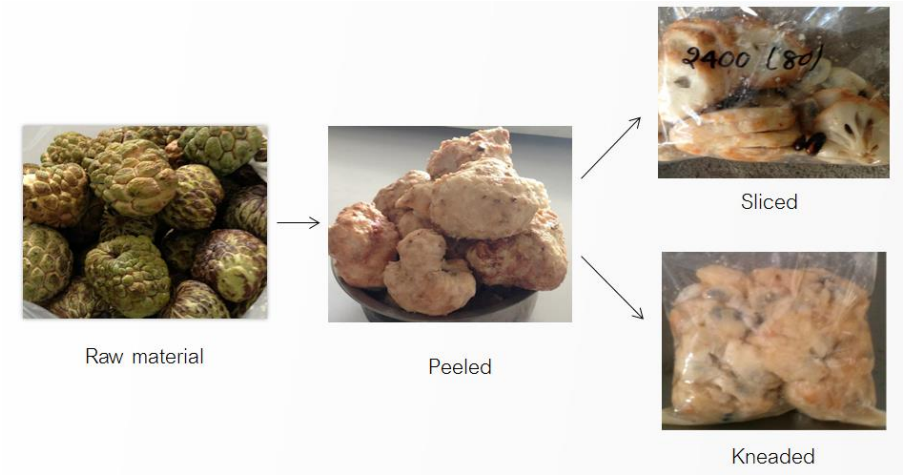


Figure 3 Sugar apple preparations for the experiments.

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการวิจัยเป็น 2 ส่วนคือ ในส่วนที่ 1 ทำการศึกษาผลกระทบของสายพันธ์น้อยหน่า 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ฝ้าย (Fai) กับพันธุ์หนัง (Nang) ต่อปริมาณเนื้อที่แยกได้ด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลาง โดยทำการทดลองแยกเมล็ดด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็วรอบ 2100 2400 2700 และ 3000 รอบต่อนาที ที่เวลา 60 วินาที ต่อปริมาณน้อยหน่า 400 กรัม ในแต่ละตัวอย่างทำการทดลอง 3 ซ้ำ

การวิจัยในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาปัจจัยการเหวี่ยงแยกเนื้อน้อยหน่าแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อศึกษาปัจจัยของความเร็วรอบ 4 ระดับคือ คือ 2100 2400 2700 และ 3000 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ 4 ระดับ คือ 60 70 80 และ 90 วินาที ตัวอย่างน้อยหน่าที่ใช้ทดสอบได้แก่ น้อยหน่าพันธุ์หนังโดยนำมาปอกเปลือกออกและนำไปกระทำเป็น 2 กรณี คือ หั่นเป็นแว่นหนา 20 มิลลิเมตร และบีบนวดให้แบนโดยใช้ซึ่งจำลองจากการผลิตจริงในอุตสาหกรรม

สำหรับการทดสอบปัจจัยการเหวี่ยงแยกเนื้อน้อยหน่าด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ใช้แผนการทดสอบแบบสุ่มในบล็อกอย่างสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design (RCBD) 4×4 กรรมวิธี 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างแต่ละกรรมวิธี โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) และวิเคราะห์ผลทางสถิติ ค่าชี้ผลในการเหวี่ยงแยกแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ได้แก่ ปริมาณเนื้อน้อยหน่าเหวี่ยงแยกได้ และคำนวณหาร้อยละของเนื้อน้อยหน่าที่เหวี่ยงแยกได้จากสมการที่ 2 และรูปของเนื้อน้อยหน่าและเมล็ดที่ค้างในเครื่องเหวี่ยงแยกแสดงใน Figure 4

$$\text{ร้อยละของเนื้อน้อยหน่าที่เหวี่ยงแยกได้} = \frac{\text{น้ำหนักเนื้อน้อยหน่าที่ได้จากเครื่องเหวี่ยงแยก}}{\text{น้ำหนักน้อยหน่าเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักเมล็ด}} \qquad (2)$$

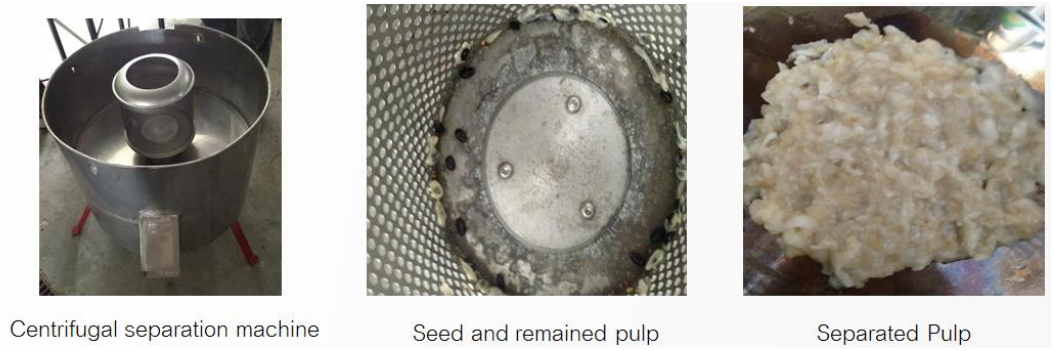


Figure 4 Experimental equipment and characteristic of seed and separated pulp.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลกระทบของน้อยหน่าพันธุ์ฝ้ายและพันธุ์หนังต่อการเหวี่ยงแยก

การทดลองถึงความแตกต่างกันของน้อยหน่า 2 สายพันธุ์ ได้แก่น้อยหน่าพันธุ์หนังและน้อยหน่าพันธุ์ฝ้าย แสดงใน Table 2 ซึ่งพบว่า น้อยหน่าพันธุ์หนังมีร้อยละปริมาณเนื้อที่เหวี่ยงแยกได้เฉลี่ย 69.64±7.64 และน้อยหน่าพันธุ์ฝ้ายมีร้อยละปริมาณเนื้อที่เหวี่ยงแยกได้เฉลี่ย 71.28±5.35 เมื่อทดสอบความแตกต่างของปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่เหวี่ยงแยกได้ทั้งสองพันธุ์พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

Table 2 The t-test comparison between Fai and Nang sugar apple when extracted by the separator.

Sugar apple	N	Mean	SD.	t-value	Sig.
Fai	12	69.64	7.64	0.608	0.549ns
Nang	12	71.28	5.35		

ผลการทดลองพบว่า แม้เนื้อของน้อยหน่าทั้ง 2 สายพันธุ์จะมีความแตกต่างกัน แต่เมื่อนำมาแยกเมล็ดด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแล้วพบว่าเนื้อสัมผัสดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบกับปริมาณเนื้อที่เหวี่ยงแยกได้ นั่นอาจเป็นเพราะแรงเหวี่ยงหนีศูนย์ที่กระทำต่อเนื้อน้อยหน่ามีค่าสูงมากจนแรงยึดเกาะหรือความเหนียวของเนื้อน้อยหน่าทั้งสองสายพันธุ์ไม่มีผลกระทบต่อการเหวี่ยงแยก

ผลของการเหวี่ยงแยกต่อปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่ได้

การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาปัจจัยการเหวี่ยงแยกต่อปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่เหวี่ยงแยกได้ โดยเตรียมเนื้อน้อยหน่าพันธุ์หนังด้วยวิธีการหั่นเป็นชิ้น (slicing) และการบีบนวด (kneading) ผลการทดลองแสดงใน Table 3 พบว่าปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่เหวี่ยงแยกได้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบหมุนเหวี่ยงมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของรัตนาพรและนงนุช (2553) ธนพงษ์และสราญจิต (2553) และพงษ์มนัสและเอื้อ (2551)

ปริมาณร้อยละของเนื้อน้อยหน่าที่แยกได้จากน้อยหน่าที่ผ่านการหั่น มีปริมาณเนื้อที่เหวี่ยงแยกได้มากที่สุดที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที แต่พบว่าที่เวลา 70 80 และ 90 วินาที ปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่เหวี่ยงแยกได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือมีปริมาณเนื้อร้อยละ 72.87±2.88 74.88±2.29 และ 76.02±2.75 ตามลำดับ และการเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบต่ำคือ 2100 รอบ/นาทีพบว่าแยกปริมาณเนื้อได้เฉลี่ยต่ำกว่าร้อยละ 50

Table 3. The percentage of sugar apple meat extracted from the sliced sugar apple.

Centrifugation time (second)	Revolution speed (rpm)			
	2100	2400	2700	3000
60	37.56±3.00a	45.31±2.66a	61.19±2.73a	65.48±1.37a
70	38.73±2.41a	48.57±2.66a	63.37±2.82ab	72.87±2.88b
80	44.76±1.66b	54.50±3.20b	64.85±2.11ab	74.88±2.29b
90	50.10±2.49c	55.46±1.39b	66.89±1.15b	76.02±2.75b

สำหรับน้อยหน่าที่ผ่านการบีบนวด แสดงใน Table 4 พบว่ามีผลการทดลองคล้ายกับน้อยหน่าที่ผ่านการหั่น แต่ปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่ได้มีปริมาณมากกว่าที่เวลาและรอบการหมุนเท่ากัน และที่ความเร็วรอบ 3000 รอบ/นาที เนื้อน้อยหน่ามีปริมาณสูงที่สุด ขณะที่ปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่เวลาการหมุนเหวี่ยง 80 นาทีและ 90 นาที ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือได้เนื้อน้อยหน่าร้อยละ 87.00±0.77 และ 87.78±1.16 ตามลำดับ

Table 4. The percentage of sugar apple meat extracted from the kneaded sugar apple.

Centrifugation time (second)	Revolution speed (rpm)			
	2100	2400	2700	3000
60	59.92±2.51a	70.58±0.38a	75.82±2.84a	84.68±1.05a
70	67.65±3.12b	76.93±1.37b	83.23±0.67b	83.69±0.80a
80	67.02±2.26b	79.08±2.44b	82.95±1.59b	87.00±0.77b
90	72.99±2.60c	80.03±1.64b	86.66±3.39b	87.78±1.16b

เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่ได้พบว่าปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่เตรียมด้วยการหั่นน้อยกว่าน้อยหน่าที่เตรียมการบีบนวด อาจเนื่องจากในการบีบนวดมีแรงบีบอัดทำให้เนื้อน้อยหน่ามีการแตก เนื้อและเมล็ดบางส่วนกระจายออกจากกันทำให้เหวี่ยงแยกได้ง่ายกว่าเนื้อของน้อยหน่าหนังที่ผ่านการหั่น เพราะการหั่น

เป็นแว่นนั้นเนื้อน้อยหน่าส่วนใหญ่ยังคงยึดเกาะกันแน่นทำให้การหมุนเหวี่ยงใช้เวลานานขึ้น สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหมุนเหวี่ยงแยกคือ ความเร็วรอบของการหมุน 3000 รอบ/นาที ใช้เวลา 80 วินาที ซึ่งจะได้ปริมาณเนื้อร้อยละ 87.00±0.77 สำหรับเนื้อน้อยหน่าส่วนที่แยกไม่ได้นั้นเป็นเนื้อในส่วนที่ติดกับขั้วเมล็ดมีลักษณะเหนียวเกาะแน่นที่ขั้วของเมล็ด

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเนื้อน้อยหน่าที่เหวี่ยงแยกได้ด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางกับการแยกด้วยแรงงานคนที่ใช้ผ้ากรองตาห่างในอุตสาหกรรมที่บีบนวดแยกเนื้อน้อยหน่าได้ประมาณร้อยละ 70 พบว่าการเหวี่ยงแยกด้วยแรงหนีศูนย์กลางจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและใช้เวลาในการทำงานน้อยลง

สรุป

การแยกเนื้อน้อยหน่าด้วยวิธีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางพบว่า ปริมาณเนื้อน้อยหน่าจะขึ้นอยู่กับรอบการหมุนและระยะเวลาของการเหวี่ยงแยก โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเหวี่ยงแยกเนื้อน้อยหน่า คือ ความเร็วรอบที่ 3000 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการเหวี่ยงแยกเนื้อน้อยหน่า 80 วินาที สามารถเหวี่ยงแยกเนื้อน้อยหน่าได้มากที่สุดเฉลี่ยที่ร้อยละ 87.00±0.77 และน้อยหน่าควรเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการบีบนวดหรือบี้ให้แบน กระบอกเหวี่ยงแยกสร้างจากตะแกรงที่มีรูขนาด 5 มิลลิเมตร ผลการวิจัยที่ได้เป็นที่พอใจแก่ภาคอุตสาหกรรมอย่างมาก และมีโครงการความร่วมกันพัฒนาเป็นเครื่องเหวี่ยงแยกเนื้อน้อยหน่าเป็นแบบต่อเนื่องต่อไปโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ คือ วิธีการเตรียมตัวอย่าง ขนาดรูตะแกรง ความเร็วรอบหรือความเร็วเชิงเส้นของกระบอกเหวี่ยง เวลาในการเหวี่ยงแยก เพื่อออกแบบการผลิตให้สามารถทำงานได้ต่อเนื่องช่วยเพิ่มกำลังการผลิต ลดการปนเปื้อน ทำให้เนื้อน้อยหน่ามีคุณภาพสูงขึ้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนางสาวพัชรี สิทธิรังษินันท์ นางสาว ศศิธร ไชยศิวามงคลและนางสาวอิสรี พงษ์ธีระพล สำหรับความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

ธนพงษ์ ร่วมสุข ธารทอง อัศวพิริยานนท์ และสราญจิต อุ่นจิตต. 2548. **การออกแบบเครื่องแยกเนื้อสำรอง**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.

พงษ์มนัส ศรีวิทยานันต์ พนัสภูมิ พรงาม และเอื้อ ยืนนาน. 2551. **การศึกษาผลของความเร็วรอบและขนาดรูตะแกรงต่อการเหวี่ยงแยกเนื้อสำรอง**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เรืองศักดิ์ กมขุนทด และ กวิศร์ วานิชกุล. (2553). **การสำรวจ รวบรวมและจำแนกเชื้อพันธุ์น้อยหน่าและน้อยหน่าลูกผสมในประเทศไทย**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา. กระทรวงศึกษาธิการ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

รัตนาพร ศรีม่วงกลาง สุภาพร พานสัมฤทธิ์ และนงนุช ประสพเย็น. 2553. **การออกแบบและสร้างเครื่องแยกเนื้อมังคุด**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

สิทธา สุวรรณโสภณนิเวศร์ ดาวทอง ธนศิษฏ์ วงศ์ศิริ อำนวยและสุเนตร โม่งปราณีต. 2551. **การพัฒนาถังแยกน้ำและเมล็ดแบบหมุนเหวี่ยงในแนวตั้งจากแว่นเสาวรรส**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Campbell, C.W., and Phillips, R.L. 1980. **The atemoya**. Fruit crops facts sheet. Agricultural Extension Service, University of Florida, USA : 1-3.

Pinto, A. C. de Q. 2005. Major and minor productión areas. In: Williams, J. T., R. W. Smith, A. Huhes, N. Haq, and C. R. Clement (eds). **Annona Species**. International Centre for Underutilised Crops, University of Southampton, UK : 21–25.

ปัญหาของการพัฒนาโครงการภาครัฐที่เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน กรณีศึกษา โครงการพัฒนาแหล่งน้ำภายใต้การดำเนินงานของกรมชลประทาน

Problems in Development for Sustainable Government Project A Case Study of Water Resources in Royal Irrigation Department (RID)

ปรเมนทร์ ขะพินิจ[1*] และ ปิยนุช เวทย์วิวรณ์[2]

Poramen Kapinit[1*] and Piyanut Wethyavivorn[2]

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาปัญหาของการพัฒนาโครงการแหล่งน้ำของกรมชลประทานให้เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน โดยทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานการพัฒนาโครงการอย่างยั่งยืนในต่างประเทศ โดยเก็บข้อมูลกรณีศึกษา 2 โครงการ จากเอกสารร่วมกับการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องในการพัฒนาโครงการกรณีศึกษา ผลการศึกษาพบว่า มีข้อบกพร่องในขั้นตอนกระบวนการริเริ่มโครงการ 2 ด้าน คือ ด้านข้อกำหนดหรือหลักเกณฑ์และด้านความเหมาะสมของบุคลากรในการพิจาณา ด้านข้อกำหนดหรือหลักเกณฑ์ พบว่า ปัจจุบันยังมีการใช้หลักเกณฑ์ที่ล้าสมัย ไม่ได้มีการปรับปรุงให้ตรงกับสถานการณ์ปัจจุบัน เช่น ข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม ข้อกำหนดเกี่ยวกับโครงสร้างพื้นฐานประกอบอื่นๆ ข้อกำหนดเกี่ยวกับกระบวนการภาคประชาสังคม และที่สำคัญยังขาดการเปรียบเทียบประโยชน์ระหว่างพัฒนาโครงการขึ้นและไม่พัฒนาโครงการเลย ในส่วนประเด็นด้านความเหมาะสมของบุคลากรในการพิจาณา พบว่า ส่วนที่เป็นปัญหาสำคัญคือการขาดการบูรณาการจากหน่วยงานภาครัฐและรัฐวิสาหกิจที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงการโดยตรง และการคัดสรรบุคลากรที่มีความรู้และประสบการณ์ที่เหมาะสมในการทำการศึกษาเบื้องต้น

ABSTRACT

The objective of this research to study the problems in development of Royal Irrigation Department project in a sustainable manner. Two case studies were selected to compare the project development stage with the international standard of sustainable project development. The data was gathered from archival records and in-depth interviews with key staffs involved with the development of the projects. The results indicate two areas of problems: obsolete rules and regulations, and knowledge and experiences of experts involved in the development process. Rules and regulations have been developed a few decades ago such as criteria relates to environmental assessment, specifications of related infrastructure, and public involvement process. The lack of integration among related agencies especially government units and state enterprises is found to be a very important issue. Also, the lack of appropriate of knowledge and experiences of expert during the feasibility

Key Word: project planning, government project, water resources, sustainable development, sustainable construction

Corresponding Author; E-mail address: p.kapinit@gmail.com

[1] สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน 811 ถนนสามเสน แขวงเขตนครชัยศรี เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

[1] Office of Water Management and Hydrology, Royal Irrigation Department, 811 Samsen Rd. Nakornchaisri Dusit Bangkok

[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Rd. Chatuchak Bangkok

คำนำ

ปัจจุบันปัญหาการต่อต้านการสร้างเขื่อนมีกระแสต่อต้านอย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านการรณรงค์ หรือเรียกร้องให้มีการยุติการก่อสร้างเขื่อน โดยกระแสดังกล่าวมีทั้งผู้เห็นด้วยและไม่เห็นด้วยอันเนื่องมาจากหลายสาเหตุ สำหรับกลุ่มที่เห็นด้วยกับการสร้างเขื่อนนั้น ได้ให้เหตุผลด้านความต้องการในการก่อสร้าง คือ ช่วยเก็บกักน้ำไว้ใช้ในช่วงหน้าแล้ง ช่วยป้องกันน้ำท่วม ช่วยพัฒนาเศรษฐกิจของชุมชนในบริเวณใกล้เคียง และเหตุผลด้านความต้องการอื่นๆ เช่น เป็นการลงทุนเพื่อกระตุ้นเศรษฐกิจของประเทศในภาพรวม เป็นแหล่งเพาะพันธุ์สัตว์น้ำ เป็นต้น ในทางกลับกันกลุ่มที่ไม่เห็นด้วยที่ประเทศไทยไม่ควรสร้างเขื่อนอีกต่อไป ให้เหตุผลว่า จะทำให้ประเทศต้องสูญเสียผืนป่าและสัตว์ป่า ที่เป็นแหล่งอาหารและแหล่งเก็บกักน้ำตามธรรมชาติ ไม่เชื่อว่าเขื่อนจะช่วยแก้ปัญหาภัยแล้งและน้ำท่วมได้ ภาวะโลกร้อนทำให้ฝนไม่ตกต้องตามฤดูกาลในทุกพื้นที่ การสร้างเขื่อนจึงไม่ใช่การแก้ปัญหาที่ดีที่สุด มีปัญหาคอร์รัปชั่น ส่วนสาเหตุอื่นๆ เช่น ตะกอนดิน และเศษไม้อาจทำให้คุณภาพน้ำในเขื่อนเน่าเสีย ส่งผลต่อวิถีชีวิตของคนในพื้นที่โดยรอบ เป็นต้น

จากกระแสดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีกลุ่มบุคคลที่เห็นต่างในประโยชน์ของเขื่อนที่ต่างกันออกไปอันเกิดจากความเข้าใจ หรือการได้รับข้อมูลที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ปัญหาการไม่เข้าใจกันของกลุ่มบุคคลทั้งสองฝ่ายยังไม่ได้รับการแก้ไข หรือชี้ประเด็นในความถูกต้องเหมาะสมเท่าที่ควร จึงจะเป็นต้องมีการบูรณาการความรู้ที่เป็นมาตรฐานที่หลายภาคส่วน หลายหน่วยงาน ตลอดจนภาคประชาสังคมยอมรับ ที่รวบรวมเป็นมีความเป็นกลางทางด้านข้อมูล มาตรฐานการ ชี้วัดอย่างเป็นระบบและยั่งยืน ทั้งนี้งานวิจันนี้ได้ศึกษาจากการคัดเลือกโครงการที่มีความต่างกันในด้านการพิจาณาความเหมาะสม ด้านการขั้นตอนการศึกษา ด้านระยะเวลาในการดำเนินงาน ด้านงบประมาณ ได้เป็นกรณีตัวอย่างที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำที่ดำเนินการโดยกรมชลประทาน อีกทั้งยังศึกษารูปแบบการพิจารณาดำเนินการโครงการก่อสร้างที่ยั่งยืนของต่างประเทศในหลายๆ ประเทศ อันได้แก่ สหราชอาณาจักร สหภาพยุโรป ประเทศออสเตรเลีย รัฐควีนส์แลนด์ เป็นต้น

จากการศึกษาพบว่างบประมาณในการดำเนินงานในด้านต่างๆ ของกรมชลประทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในแต่ละปี ทั้งนั้นเนื่องมาจากนโยบายด้านการพัฒนาแหล่งน้ำ และการบริหารจัดการน้ำตามที่ได้ประกาศในแผนการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 10 ประเด็น ยุทธศาสตร์การพัฒนาบนฐานความหลากหลายทางชีวภาพ และการสร้างความมั่นคงของฐานทรัพยากรและคุณภาพสิ่งแวดล้อม มีสาระสำคัญในการประกาศใช้โดยให้มีการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำอย่างบูรณาการ จึงมีความจำเป็นเร่งด่วนในการพัฒนาแหล่งน้ำ โดยให้กรมชลประทาน เป็นหน่วยงานหลักในการจัดทำแผนคำรับรองการปฏิบัติราชการที่ทำไว้ต่อการบริหารราชการแผ่นดิน ทั้งนี้จะเห็นได้ว่างบประมาณที่ได้รับการจัดสรรในการดำเนินงานของกรมชลประทานได้มีสัดส่วนงบประมาณรายจ่ายประจำปี (กรมชลประทาน,2556) โดยจำแนกตามงบรายจ่ายปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 จะเห็นได้ว่า งบลงทุนมีอัตราส่วนด้านงบประมาณสูงถึง 76.63 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีมูลค่าสูงเมื่อเทียบกับรายจ่ายในด้านอื่นๆ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเพื่อสำรวจวิธีการ ระเบียบ ข้อบังคับของทางราชการ โดยมุ่งเน้นโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ที่มีมาตรฐานการดำเนิน การก่อสร้าง การศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม กระบวนการก่อสร้างตลอดจนความต้องการ ที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาศึกษา 2 โครงการ ได้แก่ โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และโครงการที่มีปัญหาในการดำเนินการก่อสร้าง เพื่อสามารถนำผลมาเปรียบเทียบเสนอแนะรูปแบบ แนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืนได้

โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาแนวทางการพัฒนาโครงการแหล่งน้ำของกรมชลประทาน เปรียบเทียบกับมาตรฐานด้านความยั่งยืนกับต่างประเทศ ศึกษาประเมินการพัฒนาโครงการแหล่งน้ำของกรมชลประทาน 2 โครงการ เปรียบเทียบมาตรฐานการพัฒนาของต่างประเทศ พร้อมทั้งระบุถึงปัญหาของการดำเนินงานพัฒนาแหล่งน้ำของภาครัฐที่ขาดความยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการพัฒนาโครงการภาครัฐที่เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืนกรณีศึกษาโครงการพัฒนาแหล่งน้ำภายใต้การดำเนินงานของกรมชลประทาน เป็นการศึกษาวิจัยโดยดำเนินการศึกษารูปแบบการทำงานปัจจุบันและที่ผ่านมาในอดีต โดยทำการศึกษารูปแบบของกระกวนการทำงาน รูปแบบการพิจารณาความเหมาะสมโครงการ รูปแบบการคัดเลือกโครงการ รูปแบบในการจัดสรรโครงการ รวมทั้งงบประมาณในการดำเนินงาน จำนวน 2 โครงการ ได้แก่ 1) โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ คือ เขื่อนแควน้อยบำรุงแดน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอวัดโบสถ์ จังหวัดพิษณุโลก 2) โครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดใหญ่ คือโครงการพัฒนาต้นน้ำในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ โครงการแก่งเสือเต้น อำเภอสอง จังหวัดแพร่

จากการคัดเลือกโครงการที่มีความต่างกันในด้านการพิจาณาความเหมาะสม ด้านขั้นตอนการศึกษา ด้านระยะเวลาในการดำเนินงาน ด้านงบประมาณ ได้เป็นกรณีตัวอย่างที่สามารถนำมาเปรียบเทียบแผนแม่บทการบริหารจัดการโครงการก่อสร้างของประเทศไทย หรือแนวทางการจัดทำกรอบการประสานงานอย่างบูรณาการของประเทศไทย อีกทั้งยังศึกษารูปแบบการพิจารณาดำเนินการโครงการก่อสร้างที่ยั่งยืนของต่างประเทศในหลายๆ ประเทศ อันได้แก่ สหราชอาณาจักร สหภาพยุโรป ประเทศออสเตรเลีย และรัฐควีนส์แลนด์ เป็นต้น

ผลการคัดเลือกโครงการที่มีความต่างกันในด้านต่างๆ นำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของทั้งในประเทศและต่างประเทศได้ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์และมีความแตกต่าง และเพื่อความถูกต้องและครอบคลุมในการวิจัย ได้ดำเนินการศึกษาสำรวจ เก็บข้อมูลเบื้องต้นของโครงการ ตรวจสอบการดำนินงานที่ผ่านมาในอดีตและปัจจุบัน ดำเนินการสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้องด้านการพัฒนาแหล่งน้ำ ได้ออกมาเป็นผลการสำรวจและเก็บข้อมูลเปรียบเทียบเกณฑ์การพัฒนาอย่างยั่งยืนตามมาตรฐานทั้งในและต่างประเทศที่มีการพิจารณาสำรวจข้อมูลเบื้องต้น และได้มีการพิจารณาความเที่ยงตรงจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการพัฒนาแหล่งน้ำ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยรูปแบบการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) โดยการค้นหาความรู้ที่เป็นความจริง จากผู้เชี่ยวชาญที่ทำงานด้านการพัฒนาแหล่งน้ำ หรือผู้ทรงคุณวุฒิด้านการพัฒนา หรือบริหารจัดการน้ำของประเทศไทย (Key Informants) ในประเด็นปัญหาที่ได้การศึกษาวิเคราะห์ในเบื้องต้น

ในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกผู้เชี่ยวชาญในการให้ข้อมูลโดยพิจารณาจากความชำนาญของตำแหน่ง ความรู้ด้านกฎหมายที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งประสบการณ์ในการทำงานด้านการพัฒนาแหล่งน้ำ เพื่อที่จะสามารถให้คำตอบในประเด็นด้านการพัฒนาอย่างยั่งยืนได้ครบถ้วน ครอบคลุม และเป็นการมองภาพโดยรวมของการพัฒนา จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการในการตีความเพื่อการวิเคราะห์เนื้อหา และวิเคราะห์ปรับแก้ไขประเดินปัญหาจากการศึกษาจากทุกแหล่งข้อมูลอย่างละเอียดและถี่ถ้วนจนตกผลึก (Internal Validity) พร้อมทั้งเสนอแนวทางการพัฒนาโครงการภาครัฐที่เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน ของโครงการพัฒนาแหล่งน้ำภายใต้การดำเนินงานของกรมชลประทาน เพื่อการพัฒนาแหล่งน้ำของหน่วยงานราชการให้มีการบูรณาการความรู้ แนวทางการปฏิบัติ แนวทางการบริหารจัดการให้มีความครอบคลุม ยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาแนวทางการพัฒนาโครงการภาครัฐที่เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน กรณีศึกษา โครงการพัฒนาแหล่งน้ำภายใต้การดำเนินงานของกรมชลประทาน ได้ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลการพัฒนาแหล่งน้ำภายใต้การดำเนินงานของกรมชลประทาน ได้แบ่งผลการศึกษาตามขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาวิจัยออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

- **ส่วนที่ 1 การเปรียบเทียบศึกษารูปแบบการพิจารณาดำเนินการโครงการก่อสร้างที่ยั่งยืนของต่างประเทศเปรียบเทียบกับการศึกษาแผนแม่บทการบริหารจัดการโครงการก่อสร้างของประเทศไทย**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการพัฒนาโครงการภาครัฐที่เกิดประโยชน์อย่างยั่งยืน กรณีศึกษาโครงการพัฒนาแหล่งน้ำภายใต้การดำเนินงานของกรมชลประทาน ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์แนวทางการดำเนินงานอย่างยั่งยืน ของมาตรฐานของต่างประเทศ



Figure 1 History of the Case study.

โครงการเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน

เป็นโครงการที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงมีพระราชดำริเมื่อ 20 กรกฎาคม 2525 โดยเป็นเขื่อนหินทิ้งดาดคอนกรีตขนาดใหญ่ สามารถเก็บกักน้ำได้ 939 ล้าน ลบ.ม. เพื่อประโยชน์ด้านการชลประทาน โดยมีพื้นที่ชลประทานที่สามารถส่งน้ำได้ 155,166 ไร่ ส่งเสริมพื้นที่ภัยแล้งในลุ่มเจ้าพระยา 250,000 ไร่ และมีสถานีสูบน้ำช่วยการเกษตรกรรม 24,000 ไร่ โดยส่งน้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภค เกษตรกรรม อุตสาหกรรม เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ปลาน้ำจืด เป็นแหล่งท่องเที่ยวของจังหวัด และสามารถบรรเทาปัญหาอุทกภัยในเขตจังหวัดพิษณุโลก (สำนักงานนโยบายและแผนฯ, 2548)

โครงการแก่งเสือเต้น

เป็นโครงการก่อสร้างเขื่อนขนาดใหญ่ ก่อสร้างในแม่น้ำยม โดยเป็นเขื่อนหินทิ้งดาดคอนกรีตขนาดใหญ่ สามารถเก็บกักน้ำได้ 1,050 ล้าน ลบ.ม. แต่จำเป็นต้องอพยพราษฎร 716 ครัวเรือน (กรมชลประทาน, 2541) เพื่อการแก้ไขปัญหาอุทกภัยในเขตพื้นที่จังหวัดแพร่ นครสวรรค์ สุโขทัย และพิษณุโลก แก้ไขปัญหาการขาดแคลนน้ำอุปโภค-บริโภคในช่วงฤดูแล้ง สภาพปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเป็นประจำและมีแนวโน้มรุนแรงเพิ่มขึ้นในอนาคต จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาโครงการแหล่งน้ำขนาดใหญ่ในพื้นที่ลุ่มน้ำยม

การศึกษาวิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลของมาตรฐานการดำเนินการต่างๆ ของทั้งต่างประเทศและในประเทศเพื่อการการวิเคราะห์ที่มาของโครงการ ในช่วงการดำเนินการคัดเลือกโครงการในขั้นตอนการศึกษาความต้องการของโครงการ หาเหตุผลความจำเป็นของโครงการ หาแนวทางของโครงการและคัดเลือกโครงการที่เหมาะสม โดยสามารถวิเคราะห์ออกมาเป็นผลการศึกษาเปรียบเทียบการดำเนินการโครงการพัฒนาแหล่งน้ำในประเทศไทย กับมาตรฐานการดำเนินงานในต่างประเทศ ในขั้นตอนศึกษาความต้องการของโครงการ ถึงการคัดเลือกโครงการที่เหมาะสม

พบว่ามาตรฐานการดำเนินงานต่างๆ ในขั้นตอนศึกษาความต้องการของโครงการ ถึงการคัดเลือกโครงการที่เหมาะสมมีความคล้อยคลึงกันต่างกันตามบริบทของสถานที่ รูปแบบโครงการ แต่จะพบว่าในมาตรฐาน The Achieving Excellence Procurement Guides 11 ของประเทศอังกฤษมีความครบถ้วนในด้านการคำนึงถึงการศึกษาความต้องการของโครงการ การหาเหตุผลความจำเป็นของโครงการ คำนึงถึงทางเลือกอื่นๆที่ลดผลกระทบของโครงการ เพื่อที่จะสามารถคำนึงถึงคุ้มค่าตามความต้องการอย่างครบถ้วน และได้เสนอแนะประเด็นต่างๆ ที่สามารถนำมาปรับใช้กับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำของประเทสไทยได้อย่างเหมาะสม ตรงตามบริบทด้านการทำงานของภาครัฐในการดำเนินงานด้านการพัฒนาแหล่งน้ำ

- **ส่วนที่ 2 การเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลการสำรวจและเก็บข้อมูลเปรียบเทียบเกณฑ์การพัฒนาอย่างยั่งยืนตามมาตรฐานเทียบกับโครงการก่อสร้างที่ผ่านมา**

Table 1 Comparison of Operating Standards for Sustainable Development.

The Achieving Excellence Procurement Guides 11 Gateway™ 1: Business Justification	โครงการเขื่อนแคว้นน้อยบำรุงแดน		โครงการแก่งเสือเต้น	
	ด้านข้อกำหนดตามมาตรฐาน	ด้านผู้เชียวชาญในการพิจารณา	ด้านข้อกำหนดตามมาตรฐาน	ด้านผู้เชียวชาญในการพิจารณา
ศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ ศึกษาความต้องการของโครงการ หาเหตุผลความจำเป็นของโครงการ				
GW1-1 ศึกษาความคุ้มค่าของโครงการ	B	C	B	B
GW1-2 ศึกษาแนวทางความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐกิจ	B	B	A	C
GW1-3 ศึกษารูปแบบการใช้งาน	A	B	A	B
GW1-4 ศึกษารูปแบบการลงทุน และการส่งมอบโครงการ	A	B	B	A
ศึกษาแนวทางของโครงการและคัดเลือกโครงการที่เหมาะสมทางด้านสิ่งแวดล้อม				
GW1-5 ศึกษาด้านสถานที่ตั้งในพท.อนุรักษ์ พท.อุทยาน	A	B	A	B
GW1-6 ศึกษาโครงสร้างพื้นฐาน ด้านการขนส่ง	B	C	C	C
GW1-7 ศึกษาความหลากหลายทางชีวภาพ	B	C	C	B
GW1-8 ศึกษาทางด้านพลังงานและทรัพยากรน้ำ	B	C	A	B
ศึกษาความเหมาะสมทางด้านสังคม				
GW1-9 ศึกษาผู้มีส่วนได้เสีย	A	C	B	B
GW1-10 ศึกษาทางด้านความเป็นอยู่และวัฒนธรรมพื้นถิ่น	B	B	B	B
GW1-11 ศึกษาด้านสุขภาพและความปลอดภัยในการทำงาน	C	C	C	C

หมายเหตุ ข้อกำหนดของการประเมินคะแนนด้านข้อกำหนดตามมาตรฐาน

A หมายถึง มีการพิจารณาตรงตามข้อกำหนดของ OGC อย่างครบถ้วนหรือมากกว่าโดยคำนึงถึงประโยชน์ที่ภาครับได้รับเป็นสำคัญ

B หมายถึง มีการพิจารณาตรงตามข้อกำหนดของ OGC เป็นส่วนใหญ่ โดยคำนึงถึงประโยชน์ที่ภาครับได้รับเป็นสำคัญ

C หมายถึง มีการพิจารณาตรงตามข้อกำหนดของ OGC น้อย หรือไม่มีการพิจารณา

ข้อกำหนดของการประเมินคะแนนด้านข้อกำหนดตามมาตรฐาน

A หมายถึง ใช้ผู้เชี่ยวชาญ ผู้มีประสบการณ์ ผู้รู้ทั้งจากภายในหน่วยงานและภายนอกหน่วยงาน มีการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านนั้นๆ และร่วมบูรณาการวิทยาการเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน

B หมายถึง ใช้ผู้เชี่ยวชาญ ผู้มีประสบการณ์ ผู้รู้ทั้งจากภายในหน่วยงานและภายนอกหน่วยงาน มีการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านนั้นๆ

C หมายถึง ใช้ผู้เชี่ยวชาญ ผู้มีประสบการณ์ ผู้รู้จากภายในหน่วยงาน

กระบวนการส่วนที่ 2 ได้นำผลจากการศึกษาทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Review of Relevant Literature) ข้างต้นมาดำเนินการเปรียบเทียบกับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำที่ดำเนินการ โดยทำการศึกษารูปแบบของกระบวนการทำงาน รูปแบบการพิจารณาความเหมาะสมของโครงการ รูปแบบการคัดเลือกโครงการ รูปแบบในการจัดสรรโครงการ จำนวน 2 โครงการ โดยนำมาจำแนกกลุ่มปัจจัยความเสี่ยงที่มีระดับค่าของความเสี่ยง (Risk Level) ตามการวิเคราะห์ปัญหา หรือข้อบกพร่องที่พบในกระบวนการดำเนินการศึกษา

●ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์และปรับแก้ประเด็นปัญหาจากการสัมภาษณ์และถอดองค์ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญ

Table 2 Summary of User Indepth Interview

อาชีพผู้เชี่ยวชาญที่ให้สัมภาษณ์	จำนวน	ประสบการณ์ในสายงาน	ความเกี่ยวของกับโครงการ	
			โครงการเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน	โครงการแก่งเสือเต้น
วิศวกรชลประทาน	3 คน	<5 ปี และ >15 ปี	ประเมินผลกระทบ EIMP	-
นักวิชาการสิ่งแวดล้อม	2 คน	6-10 ปี และ >15 ปี	ประเมินผลกระทบ EIMP	คณะทำงานศึกษาเพิ่มเติม
นักเศรษฐศาสตร์	2 คน	6-10 ปี และ 11-15 ปี	วิเคราะห์ประเมินผลติดตาม	คณะทำงานศึกษาเพิ่มเติม
นักวิเคราะห์นโยบายและแผน	2 คน	6-10 ปี และ 11-15 ปี	วิเคราะห์ประเมินผลติดตาม	คณะทำงานศึกษาเพิ่มเติม
นักกฎหมาย	2 คน	11-15 ปี และ >15 ปี	คณะกรรมการพิจารณา	คณะกรรมการพิจารณา
ผู้บริหาร (วิศวกรชลประทาน)	1 คน	>15 ปี	คณะทำงานศึกษา	ผู้บริหารในการตัดสินใจ

ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านการดำเนินการตามข้อกำหนดและมาตรฐานการดำเนินงาน โดยผู้ให้สัมภาษณ์เป็นผู้เชี่ยวชาญด้านการวางโครงการ วิศวกรชลประทาน นักวิชาการสิ่งแวดล้อม นักวิเคราะห์นโยบายและนักกฎหมาย และสามารถสรุปปัญหาของโครงการและวิเคราะห์ความคล้ายกันในข้อคิดเห็น กลุ่มความคิดเห็นมีประเด็นเดียวกัน ตลอดจนแนวทางของปัญหาที่แบ่งแยกเป็นข้อกำหนดทางด้านความยั่งยืน และการใช้บุคลากรในการพิจารณา

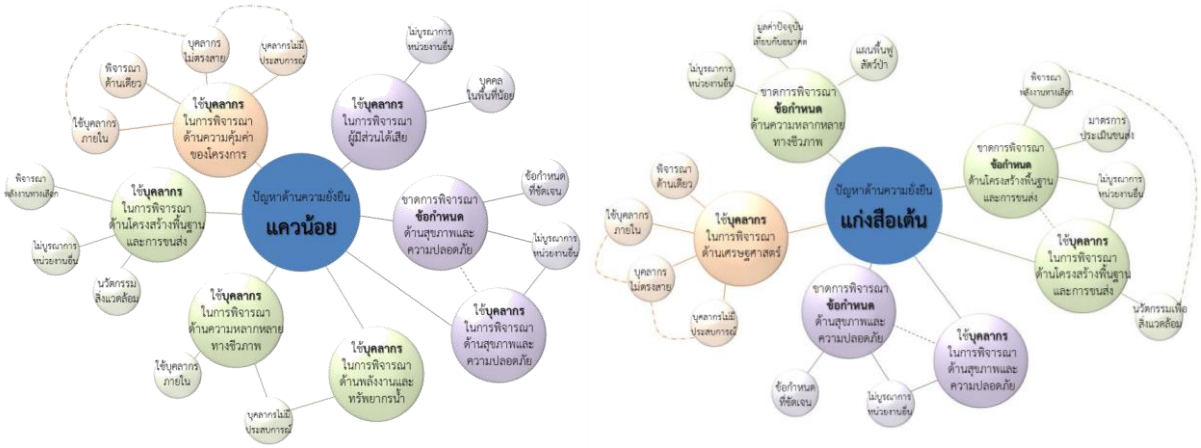


Figure 2 Summary of detailed questionnaires

จากภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าปัญด้านความยั่งยืนของโครงการพัฒนาแหล่งน้ำจากโครงการทั้ง 2 ส่วนใหญ่มีปัญหาที่มีความคล้ายคลึงกันในด้านข้อกำหนดในการพิจารณาคือ 1) ปัญหาจากการขาดการบูรณาการความรู้ระหว่างหน่วยงาน อาทิเช่น กรมทางหลวงชนบท กรมโยธาธิการและผังเมือง และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น เป็นต้น เป็นผลในการพัฒนาแหล่งน้ำในปัจจุบันไม่สามารถดำเนินการก่อสร้างตามวัตถุประสงค์ หรือเสียประโยชน์จากการใช้งานของเขื่อน 2) ปัญหาในกระบวนการตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญ โดยขาดการประเมิน ตรวจสอบที่ชัดเจน อีกทั้งยังขาดแนวทางข้อกำหนดที่ชัดเจน เป็นที่ยอมรับโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยอาศัยการอ้างอิงตามกฎหมาย 3) ขาดข้อกำหนดที่พิจารณาด้านสุขภาพและความปลอดภัยในการทำงาน หากมีการกำหนดในรายงานการศึกษาตั้งแต่กระบวนการแรกโดยมีการพิจารณาชดเชยทางด้านสุขภาพในระหว่างโครงการดำเนินงานคิดเป็นมูลค่าจะทำให้โครงการสามารถดำเนินการได้อย่างยั่งยืนมากขึ้น

ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านการพิจารณา ศึกษา และตัดสินใจการดำเนินการของโครงการ โดยผู้ให้สัมภาษณ์ให้ เห็นว่า 1) ควรมีการกำหนดบุคคลากรผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเป็นผู้มีความรู้จากภายนอกเข้าร่วมในการพิจารณาจะทำให้ได้ประเด็นการพิจารณาที่ครบถ้วน มีการพิจารณาในแง่มุมต่างๆอย่างรอบด้านและครบถ้วน เช่นในการศึกษาทางด้านสังคมในเรื่องการศึกษาความเป็นอยู่และวัฒนธรรมท้องถิ่นเป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องศึกษาโดยละเอียด โดยกระบวนการหรือข้อกำหนดดังกล่าวเป็นข้อกำหนดทางด้านความเชื่อ วิถีชีวิตที่มีบริบทต่างกันในแต่ละพื้นที่ อาจจะให้ผู้นำในท้องถิ่นที่มีความรู้ความเข้าใจให้ความคิดเห็นในกระบวนการนี้ร่วมด้วย และในกระบวนการศึกษาด้านสังคมควรมีการประชาสัมพันธ์โครงการอย่างชัดเจน และมีการคิดคำนึงถึงมูลค่าจากการสูญเสียผลประโยชน์ของโครงการ มูลค่าของวิถีชีวิตที่ได้รับผลกระทบ มูลค่าของวัฒนธรรมที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยพิจาณามูลค่าที่มีความเป็นธรรมและได้รับการยอมรับจากสังคมโดยรวม

ความคิดเห็นเพิ่มเติมจากผู้เชี่ยวชาญในด้านการพัฒนาโครงการอย่างยั่งยืน ให้ความเห็นเพิ่มเติมว่าบุคลากรที่มีความเกี่ยวข้องควรมีการฝึกอบรมโดยการเสริมทักษะความสามารถ ประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญหรือนักวิชาการที่มีความรู้ในด้านนั้นๆ ควรมีผู้มีประสบการณ์ในสายงาน หรือผู้ทรงคุณวุฒิในการพิจารณาความเหมาะสมของโครงการ และให้ผู้ที่มีส่วนรับผิดชอบสูงสุดในหน่วยงาน เป็นผู้พิจารณาตัดสินในขั้นต้นถึงความเหมาะสมในการดำเนินการศึกษาความเหมาะสมในขั้นต่อไปหรือไม่ และควรมีการมีส่วนร่วมในการปรึกษา ให้คำแนะนำจากหน่วยงานภายนอกที่มีส่วนเกี่ยวข้องเพื่อให้การดำเนินการ เพื่อเกิดการพิจารณาอย่างรอบด้านและครอบคลุมในประเด็นด้านความยั่งยืนมากขึ้น

สรุป

มาตรฐานการดำเนินงานต่างๆ ในขั้นตอนศึกษาความต้องการของโครงการ การคัดเลือกโครงการที่เหมาะสมมีความคล้อยคลึงกันต่างกันตามบริบทของสถานที่ รูปแบบโครงการ พบว่าในมาตรฐาน The Achieving Excellence Procurement Guides 11: Gateway 1 Business Justification (เหตุผลการตัดสินใจดำเนินการ) มีความครบถ้วนในด้านการคำนึงถึงการศึกษาความต้องการของโครงการ การหาเหตุผลความจำเป็นของโครงการ คำนึงถึงหาแนวทางของโครงการและคัดเลือกโครงการที่เหมาะสม ตลอดจนคำนึงถึงคุ้มค่าตามความต้องการอย่างครบถ้วน และได้เสนอแนะประเด็นต่างๆ ที่สามารถนำมาปรับใช้กับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำของประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม ตรงตามบริบทด้านการทำงานของภาครัฐในการดำเนินงานด้านการพัฒนาแหล่งน้ำ

ผลการศึกษาพบว่า มีข้อบกพร่องในขั้นตอนกระบวนการริเริ่มโครงการโดยแบ่งประเด็นข้อบกพร่องเป็น 2 ด้าน คือ ด้านข้อกำหนดหรือหลักเกณฑ์และด้านความเหมาะสมของบุคลากรในการพิจาณา ในส่วนด้านข้อกำหนดหรือหลักเกณฑ์ พบว่า ปัจจุบันยังมีการใช้หลักเกณฑ์ที่ล้าสมัย ไม่ได้มีการปรับปรุงให้ตรงกับสถานการณ์ปัจจุบัน เช่น ข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมที่การกำหนดมูลค่าของพืชพรรณ สัตว์ป่า และมูลค่าของการสูญเสียไม่ตรงกับมูลค่าในปัจจุบัน ข้อกำหนดเกี่ยวกับโครงสร้างพื้นฐานประกอบที่เป็นส่วนการพัฒนาทับซ้อนกับหน่วยงานที่รับผิดชอบดูเลยในส่วนนั้น เช่น การพัฒนาทางเข้าโครงการมีแผนพัฒนาทับซ้อนกับหน่วยงานอื่น ข้อกำหนดเกี่ยวกับกระบวนการภาคประชาสังคม ไม่มีการระบุอย่างชัดเจนในองค์ประกอบของการประชุมเพื่อการนำเสนอผลประโยชน์อย่างโครงการ และที่สำคัญยังขาดการเปรียบเทียบประโยชน์ระหว่างพัฒนาโครงการขึ้นและไม่พัฒนาโครงการเลย ในส่วนประเด็นข้อบกพร่องด้านบุคลากรในการพิจาณา พบว่า ส่วนที่เป็นปัญหาสำคัญคือการขาดการบูรณาการจากหน่วยงานภาครัฐและรัฐวิสาหกิจที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโครงการโดยตรงและการคัดสรรบุคลากรที่มีความรู้และประสบการณ์ที่เหมาะสมในการทำการศึกษาเบื้องต้น และใช้บุคลากรที่ทำการศึกษาเบื้องต้นที่ยังขาดประสบการณ์ในการศึกษา โดยใช้บุคลากรภายในหน่วยงานที่ไม่ครอบคลุมหลักด้านการพัฒนาอย่างยั่งยืน อีกทั้งยังขาดหลักเกณฑ์ในการกำหนดคุณสมบัติเฉพาะของบุคลากรที่สามารถพิจารณาโครงการให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อให้การดำเนินการโครงการมีการคิดพิจารณาอย่างรอบด้าน และครอบคลุมในประเด็นด้านความยั่งยืนมากขึ้นครอบคลุมประเด็นด้านการพัฒนาแหล่งน้ำ นำไปสู่การพัฒนาโครงการแหล่งน้ำอย่างยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน. (2556). **เอกสารประกอบการชี้แจงงบประมาณรายจ่ายประจำปี พ.ศ.2556**. กรมชลประทาน.

กรมชลประทาน.(2552). **คู่มือการวางโครงการ**. สำนักบริหารโครงการ: กรมชลประทาน.

ปัญญา คอนซัลแตนท์,พีแอนด์ซี แมเนจแมนท์, แอสดีคอน คอร์ปอเรชั่น. (2541) **งานทบทวนและสรุปผลการศึกษาความเหมาะสมของโครงการ การพัฒนาลุ่มน้ำยมโครงการแก่งเสือเต้น จังหวัดแพร่. รายงานสรุป**. กรมชลประทาน.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กันยายน 2548. **การประเมินผลการแก้ไขพัฒนาสิ่งแวดล้อมและติดตามผลกระทบสิ่งแวดล้อมโครงการเขื่อนแควน้อยบำรุงแดน จังหวัดพิษณุโลก**. สผ.

Office of Government Commerce. 2007. **Achieving Excellence in Construction Procurement Guide 11: The Achieving Excellence Procurement Guides**. London. The UK Office of Government Commerce

The Government Construction Clients' Panel (GCCP). 2000. **Achieving sustainability in construction procurement: Sustainability Action Plan**. The Government Construction Clients' Panel (GCCP)

Department of Finance: Government of Western Australian. 2011. **Sustainable Procurement Practice Guidelines**. Australian. Government of Western Australian

Department of Housing and Public Works. Queensland Government. 2009. **Procurement guidance**. Queensland Government.

การออกแบบอุปกรณ์หยุดน้ำภายในท่อจ่ายน้ำชั่วคราว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพงานภาคสนามของการประปานครหลวง

Design of temporary water stopping inside of a distribution pipe to enhance field activity of Metropolitan Waterworks Authority (MWA)

บุญลือ สิงห์บุบผา[1*] และ สุพรรณ กุลพาณิชย์ [1]

Boonlue Singbubpha[1*] and Supan Gulphanich [1]

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการดำเนินการภาคสนามของการประปานครหลวง ส่วนมากคือท่อจ่ายน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 300 มิลลิเมตร เมื่อมีปัญหากรณีท่อแตกรั่วหรือซ่อมบำรุงท่อ จำเป็นต้องปิดประตูน้ำ แต่พบอุปสรรค ทำให้ไม่สามารถปิดประตูน้ำได้ ในงานวิจัยนี้ขอนำเสนอ อุปกรณ์ที่สามารถหยุดน้ำภายในท่อได้ชั่วคราว โดยมีส่วนสำคัญคือ ปลั๊กบอล อาศัยหลักการของแรงเสียดทานของผิวสัมผัสผนังปลั๊กบอลกับผนังท่อ เพื่อเป็นแรงต้านมีทิศทางฝั่งตรงกันข้ามกับแรงของน้ำภายในท่อเพื่อหยุดการไหล แรงนี้จะเรียกว่า แรงเสียดทานสถิต ตามทฤษฎีวิเคราะห์แนวแรงตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ของนิวตัน โดยมีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุปลั๊กบอลกับท่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ การทดสอบเพื่อวัดขีดความสามารถของปลั๊กบอลคือ เพิ่มแรงดันจนกว่าน้ำภายในท่อจะหยุดไหล ณ จุดนี้แรงเสียดทานสถิตมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันน้ำภายในท่อ ในทางปฏิบัติ เพื่อความปลอดภัยจะเพิ่มแรงเสียดทานให้ใช้งานเป็น 2 เท่า ของแรงเสียดทานสถิตที่ใช้ทดสอบ

ABSTRACT

At present, field activity of Metropolitan Waterworks Authority(MWA) ,Most of distribution pipe is 300 mm of diameter. When there is a problem, the broken or maintenance pipe. Need to close gate valve ,but had problems. Can not close gate valve. This research presents device for water stopping temporary. Important part is plug ball. The principle of friction of a plug with a force to the opposite side to the water pressure force inside the pipe to stop the flow. This is called Static friction. theoretical analysis force from The third law of motion. Research has analyzed coefficient of friction for plug ball and pipe material that used in this research. In a test to measure the ability of a plug ball. By pressure increased until the water stops flowing. At this point the static friction is greater than or equal water pressure force inside the pipe. The safety guidelines will increase .The friction to be used as double of static friction test.

Key Words : Inflatable Plug, Static Friction, Pressure Control, Water Pressure

* Corresponding auther; e-mail address: **pao_instrument@hotmail.com**

[1] ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[1] Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คำนำ

ท่อจ่ายน้ำของการประปานครหลวง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มม. ส่วนมากท่อประเภทนี้อยู่ในแนวทางเดินเท้าริมถนน และใช้เป็นระบบท่อในการแบ่งพื้นที่ย่อย (District Metering Area : DMA) เพื่อการบริหารจัดการน้ำสูญเสีย (Farley, M. and Trow, S .,2003) จึงการดำเนินงานภาคสนามในระบบท่อจ่ายน้ำมีจำนวนมาก เช่น การซ่อมท่อ การตัดบรรจบท่อ การติดตั้งอุปกรณ์มาตรวัดน้ำ และการติดตั้งปรับปรุงระบบอุปกรณ์การวัดและควบคุมภาคสนาม(Remote Terminal Unit : RTU) สำหรับ DMA เป็นต้น ซึ่งการดำเนินงานดังกล่าว มีขั้นตอนหลักที่สำคัญคือ การปิดประตูน้ำ เพื่อหยุดการจ่ายน้ำชั่วคราวในพื้นที่ ปัญหาส่วนมากที่พบคือ ประตูน้ำที่ใช้ในการเปิดและปิดไม่สามารถใช้งานได้ จากหลายสาเหตุเช่น ประตูน้ำชำรุด ประตูน้ำปิดไม่สนิท แกนประตูน้ำถูกลักขโมย หรือฝาหีบประตูน้ำจมอยู่ในพื้นผิวใต้ดิน เป็นต้น

ยกตัวอย่างการดำเนินงานภาคสนามที่เกิดปัญหา เช่น งานติดตั้งปรับปรุงตู้ RTU ซึ่งในขอบเขตของงานต้องมีการถอดเปลี่ยนมิเตอร์วัดอัตราการไหล เมื่อไม่สามารถปิดประตูน้ำได้ จึงมีความจำเป็นต้องปิดประตูน้ำตัวถัดไป เพื่อดำเนินการเปลี่ยนมิเตอร์ ซึ่งจะส่งผลกระทบโดยตรงคือ มีพื้นที่ขาดน้ำเป็นบริเวณกว้างขึ้น มีข้อร้องเรียนจากผู้ใช้น้ำเนื่องจากน้ำไม่ไหลหรือไหลอ่อน และมีผลกระทบโดยอ้อม เช่น การขาดโอกาสในการบริการน้ำประปาแก่ประชาชน มีน้ำสูญเสียจากน้ำที่ค้างภายในท่อปริมาณมากเมื่อระยะทางในการปิดประตูน้ำเพิ่มขึ้น และในการคืนสภาพการจ่ายน้ำต้องใช้เวลาเพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อคุณภาพน้ำประปา เป็นต้น

งานวิจัยนี้ จึงออกแบบอุปกรณ์หยุดน้ำภายในท่อจ่ายน้ำชั่วคราว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานภาคสนาม โดยแก้ไขปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้ ใช้หลักการออกแบบของอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ขณะที่มีระบบการจ่ายน้ำปกติ ไม่ต้องหยุดการจ่ายน้ำ มีน้ำไหลภายในท่อตลอดเวลา โดยส่วนสำคัญคือ การวิเคราะห์แนวแรงของปลั๊กบอล เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นจนปลั๊กบอลขยายตัวเต็มภายในท่อ และมีแรงเสียดทานตรงผิวสัมผัสมากพอที่สามารถหยุดน้ำภายในท่อได้ (Peterson.) (Pronal ASIA-Manufacturing Elastomer Engineering.)

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบชุดอุปกรณ์หยุดน้ำภายในระบบท่อจ่ายน้ำชั่วคราว เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากที่กล่าวมานั้น อาศัยหลักการของแรงดันในชุดปลั๊กบอลอุดน้ำต้องมีค่ามากพอเพื่อมีแรงเสียดทานสถิตที่ผิวสัมผัสเพียงพอ ที่ต้านการไหลของน้ำภายในท่อที่มีทิศทางของแรงตรงกันข้าม เพื่อหยุดน้ำภายในท่อจ่ายน้ำชั่วคราว โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์แนวแรงตาม กฎการเคลื่อนที่ข้อ 3 ของนิวตัน (Newton's third law of motion) ซึ่งกล่าวว่า"ทุกแรงกิริยา (action) ย่อมมีแรงปฏิกิริยา (reaction) ซึ่งมีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศตรงข้ามกันเสมอ" และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1.ส่วนของชุดอุปกรณ์ ประกอบด้วย

1.1 หน้าจานวงกลม สำหรับติดตั้งแกนประคอง ขนาด ∅ 2 นิ้ว (Flange)

1.2 แกนประคอง คือ ท่อขนาด ∅ 3นิ้ว ความยาว 1 เมตร จำนวน 1 ท่อน (Static Rod)

1.3 วาล์วน้ำขนาด ∅ ¾ นิ้ว เพื่อระบายน้ำออกขณะดันแกนส่งลงไปภายในท่อ (Manual Valve)

1.4 Pressure Gauge ย่านการวัด 0-2 บาร์

1.5 ชุดค้ำยัน คือ ท่อขนาด ∅ 6/8 นิ้ว ความยาว 1 เมตร จำนวน 4 ท่อน (Raker Set)

1.6 แกนส่ง คือ ท่อขนาด ∅ 2 นิ้ว ความยาว 1.5 เมตร จำนวน 1 ท่อน พร้อมเชื่อมหน้าจานที่มีขนาด ∅ ½ นิ้ว ติดตั้งวาล์วน้ำขนาด ∅ ½ นิ้ว จำนวน 1 ตัว เพื่อระบายน้ำออกขณะดันแกนดันของชุดปลั๊กบอล (Insert Rod)

1.7 แกนดันชุดปลั๊กบอลหยุดน้ำ คือ ท่อขนาด ∅ 1/2นิ้ว ความยาว 2.5 เมตร จำนวน 1 ท่อน (Push Rod)

1.8 ชุดแม่แรงยกแกนดันของชุดปลั๊กบอลหยุดน้ำ 1 ชุด (Lift Jack)

1.9 ปลั๊กบอล คือ วัสดุยาง PVC รูปทรงกระบอก ขนาด ∅ 0.30 เมตร ความยาว 0.6 เมตร (Plug Ball)

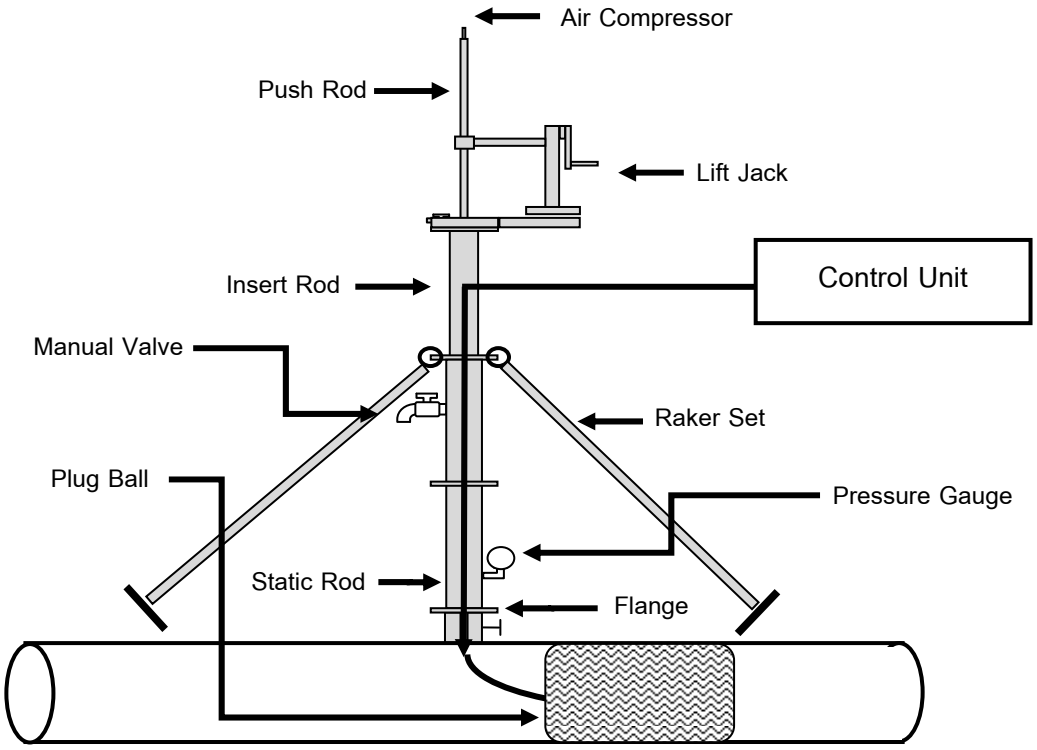


Figure 1 Components of Device

2.ส่วนของชุดควบคุมแรงดันลมปลั๊กบอล ประกอบด้วย

2.1 ปั๊มลม กำลัง 105 W ปริมาณลม 150 L/min

2.2 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันคงที่ (Service Unit)

2.3 Pressure Gauge ย่านการวัด 0-2 บาร์

2.4 วาล์วระบายแรงดัน (Release Air Valve)

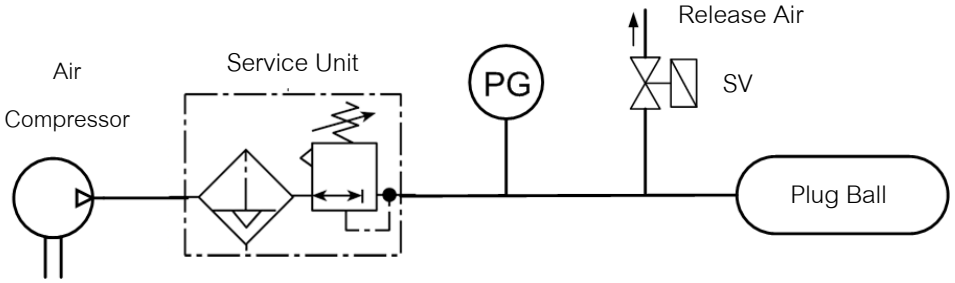


Figure 2 Control Unit

การกำหนดตัวแปรของแรงที่กระทำต่อปลั๊กบอล เพื่อหยุดการไหลของน้ำภายในท่อ

จากการออกแบบเพื่อให้อุปกรณ์หยุดน้ำภายในท่อชั่วคราวสามารถใช้งานได้ในระบบท่อจ่ายน้ำของการประปานครหลวง โดยพิจารณาจากแรงของน้ำภายในท่อ และแรงเสียดทานของปลั๊กบอลที่ผนังภายในท่อ โดย F_{break} จะต้องมีค่ามากกว่า F_{water} ตามทฤษฎีของกฎการเคลื่อนที่ข้อ 3 ของนิวตัน (Newton's third law of motion) กล่าวว่า "ทุกแรงกิริยา (action) ย่อมมีแรงปฏิกิริยา (reaction) ซึ่งมีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศตรงข้ามกันเสมอ" กฎข้อนี้เรียกว่า กฎของกิริยาและปฏิกิริยา (Law of action and reaction) แรงกิริยาและแรงปฏิกิริยาหมายถึง แรงกระทำและแรงกระทำตอบ โดยเป็นแรงซึ่งกระทำต่อมวลที่ต่างกันและเกิดขึ้นพร้อมกันเป็นคู่เสมอ โดยที่มวลอาจไม่สัมผัสกันและถือว่าแรงหนึ่งแรงใดเป็นแรงกิริยาและแรงปฏิกิริยาก็ได้ (Figure 3)

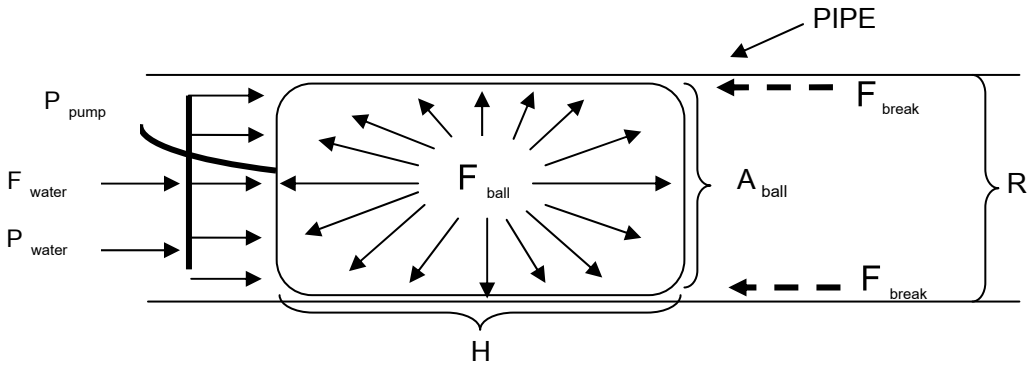


Figure 3 Force diagram of plug ball in a pipe

กำหนดให้

F_{water}	แทนแรงการทำจากน้ำในท่อกับปลั๊กบอล (นิวตัน)
F_{ball}	แทนแรงดันลมที่กระทำกับผนังภายในปลั๊กบอล (นิวตัน)
F_{break}	แทนแรงเสียดทานของปลั๊กบอลกับผนังท่อภายใน (นิวตัน)
A_{pipe}	แทนพื้นที่หน้าตัดของท่อ (ตารางเมตร)
A_{ball}	แทนพื้นที่ผิวสัมผัสภายในท่อของปลั๊กบอล (ตารางเมตร)
H	แทนความยาวของปลั๊กบอล (เมตร)
P_{water}	แทนแรงดันน้ำภายในท่อ (เมตรน้ำ)
P_{pump}	แทนแรงดันที่อัดเขาไปในปลั๊กบอล (เมตรน้ำ)
R	แทนรัศมีท่อที่ทำการทดลอง (เมตร)

ความสัมพันธ์แรงดันของน้ำภายในท่อ F_{water} และแรงเสียดทานของปลั๊กบอล F_{break}

โดยที่ $A_{ball} = H \cdot (2\pi R)$ (สมการที่ 1)

$F_{ball} = P_{pump} \cdot A_{ball}$ (สมการที่ 2)

แทนค่า สมการที่ 1 ในสมการที่ 2 จะได้

$F_{ball} = P_{pump} \cdot (H) \cdot (2\pi R)$ (สมการที่ 3)

และ $A_{pipe} = \pi R^2$ (สมการที่ 4)

$F_{water} = P_{water} \cdot A_{pipe}$ (สมการที่ 5)

แทนค่า สมการที่ 4 ในสมการที่ 5 จะได้

$$F_{water} = P_{water} . \pi R^2 \quad \text{(สมการที่ 6)}$$

โดย $$F_{break} = \mu . F_{ball} \quad \text{(สมการที่ 7)}$$

แทนค่า สมการที่ 3 ในสมการที่ 7 จะได้

$$F_{break} = \mu . [P_{pump} . (H) . (2\pi R)] \quad \text{(สมการที่ 8)}$$

จากสมการความสัมพันธ์ F_{break} ต้องมีค่ามากกว่า F_{water} โดยกำหนดให้ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) มีค่าเท่ากับ 2 โดยวิเคราะห์จากค่าแรง F_{break} ให้มีค่าเป็น 2 เท่าของ F_{water} ซึ่ง F_{water} คือแรงของน้ำภายในท่อ ที่ค่าแรงดันน้ำปกติมีค่าเฉลี่ยเพียง 10 เมตรน้ำ จากสมการความสัมพันธ์ สรุปได้ดังนี้

$$\mu . [P_{pump} . (H) . (2\pi R)] > P_{water} . \pi R^2$$

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

การคำนวณงานวิจัยนี้ ใช้ค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ ของวัสดุชนิด Polypropylene เนื่องจากเป็นค่า μ ที่เป็นวัสดุใกล้เคียงกับชนิดท่อที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งมีคุณสมบัติโครงสร้างส่วนประกอบของวัสดุที่คล้ายคลึงกัน (Anthony Jones, Jonathan UPSDELL.,2014) (Table 1)

Table 1 Coefficient of Dynamic Friction to each material

Material	Coefficient of Dynamic Friction
UHMWPE	0.1-0.2
PTFE	0.05-0.1
FEB	0.08-0.3
Polypropylene	0.3-0.4
HDPE	0.07-0.4
Ethylene tetrafluoroethlene (ETFE)	0.3-0.4
PMMA	0.5-0.8
Polycarbonate	0.3-0.9
Nylon	0.2-0.5
Acetal	0.1-0.4
Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	0.2-0.5
NexPrene (RTM) thermoplastic	0.4-0.5

โดยค่า μ (Table 1) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจลน์ (Dynamic friction) ของวัสดุแต่ละชนิดกับเหล็ก มีสภาวะอยู่ในของเหลว ซึ่งแรงเสียดทานจลน์มีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตเสมอ ในสภาวะวัสดุและสิ่งแวดล้อมเดียวกัน จึงพิจารณาใช้ค่า μ มีค่าเท่ากับ 0.4 ของวัสดุชนิด Polypropylene และโครงสร้างวัสดุชนิด PVC มีความยืดหยุ่นมากกว่าเหล็ก จึงวิเคราะห์ได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.4 ของวัสดุชนิดนี้ จึงนำมาใช้ในการคำนวณ โดยค่า μ ที่เสอดคล้องกับสภาพของท่อที่ใช้งานจริงของระบบท่อจ่ายน้ำของการประปานครหลวง มีองค์ประกอบหลายปัจจัยมาเกี่ยวข้อง เช่น ความเรียบของผนังในเส้นท่อ อายุ

การใช้งานของท่อ และชนิดต่างๆของท่อ เป็นต้น โดยการศึกษามีข้อจำกัดในทดสอบ แต่สามารถคำนวณหาค่า μ ที่แท้จริงได้จากข้อมูลการทดสอบใช้งานภาคสนามในอนาคต

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ทดลองโดยติดตั้งระบบท่อจำลอง และติดตั้งอุปกรณ์หยุดน้ำภายในระบบท่อจ่ายน้ำชั่วคราว(Figure 4) โดยพับวัสดุปลั๊กบอลอยู่ในแกนส่ง ดันแกนส่งจนได้ระยะ และดันแกนดันปลั๊กบอลเพื่อให้วัสดุปลั๊กบอลเข้าไปในท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ใช้สำหรับงานวิจัยคือ 0.30 เมตร ชนิดท่อ Polyvinyl Chloride : PVC เพราะท่อชนิดนี้มีจำนวนมากที่สุดในระบบท่อจ่ายน้ำของการประปานครหลวงในปัจจุบัน (ฝ่ายสื่อสารองค์กร.,2557) และการคำนวณจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) มีค่าเท่ากับ 0.4 ของวัสดุชนิด Polypropylene (Table 1) โดยทำการทดลอง 5 ครั้ง วิธีการคือ จำลองปั๊มแรงดันน้ำ P_{water} เข้าไปภายในระบบท่อจำลอง และกำหนดให้แรงดันคงที่ประมาณ 10 เมตรน้ำ (ฝ่ายสื่อสารองค์กร.,2557) และปั๊มแรงดันลมให้ปลั๊กบอลขยายตัวจนเต็มภายในท่อ(Figure 5) โดยกำหนดเป็น P_{pump} และเพิ่มค่าแรงดันของปลั๊กบอล เพื่อหาจุดค่าแรงดันที่อัดให้ปลั๊กบอลแล้วเริ่มหยุดการไหลของน้ำได้

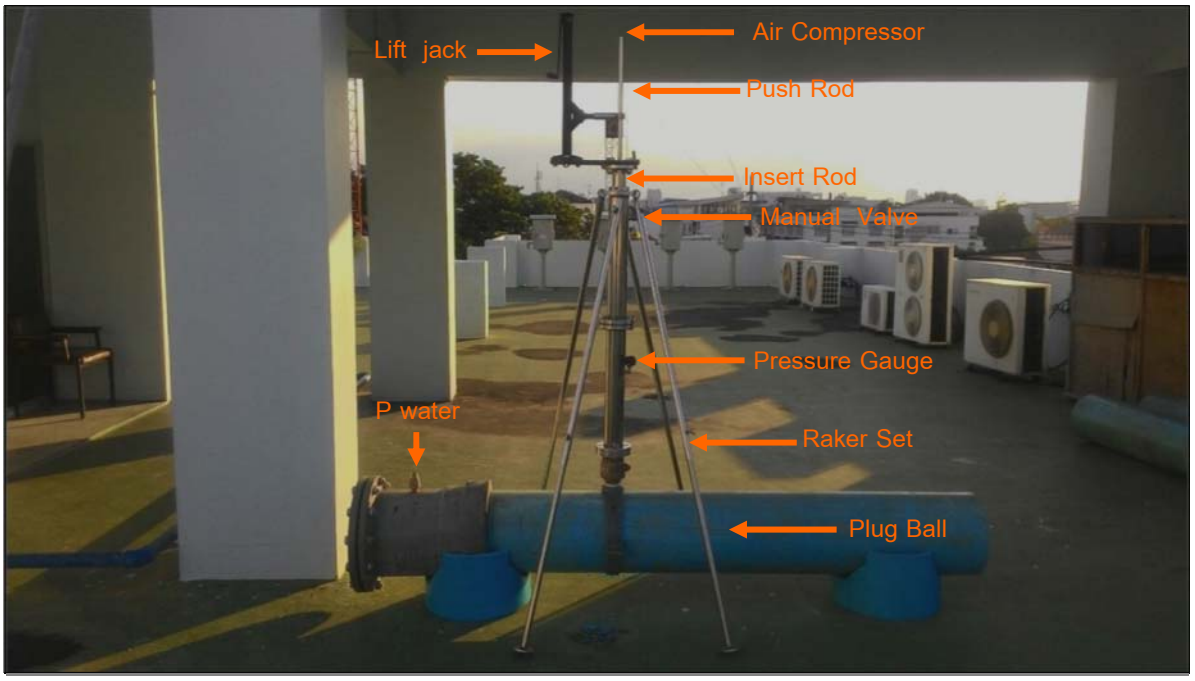


Figure 4 Model system setup



Figure 5 Plug Ball Inflation

ควบคุมระบบแรงดันคงที่ (Figure 2) และเมื่อสิ้นสุดการดำเนินการภาคสนาม ระบายแรงดันลมออกทางวาล์วระบายแรงดัน (Release Valve) (Figure 2) และใช้ระบบแม่แรง (Lift Jack) ดึงแกนดันขึ้น เพื่อให้วัสดุปลั๊กบอลหดตัวอยู่ในแกนส่ง จากนั้นดึงแกนส่งขึ้น เพื่อเป็นการดึงปลั๊กบอลออกจากระบบท่อจำลอง สิ้นสุดการทำงาน และผลการทดลอง (Table 2)

Table 2 Experimental results

Time(s)	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		Average	
	P pump (MH2O)	F break (N) (Calculate)	P pump (MH2O)	F break (N) (Calculate)	P pump (MH2O)	F break (N) (Calculate)	P pump (MH2O)	F break (N) (Calculate)	P pump (MH2O)	F break (N) (Calculate)	P pump (MH2O)	F break (N) (Calculate)
5	1.12	0.25	1.10	0.25	1.14	0.26	1.01	0.23	1.05	0.24	1.08	0.25
10	2.20	0.50	2.25	0.51	2.23	0.50	2.03	0.46	2.12	0.48	2.17	0.49
15	3.21	*0.73*	3.21	*0.73*	3.12	*0.71*	3.20	*0.72*	3.05	*0.69*	3.16	***0.72***
20	4.13	0.93	4.10	0.93	4.34	0.98	4.24	0.96	4.21	0.95	4.20	0.95
25	5.02	1.13	5.01	1.13	5.10	1.15	5.03	1.14	5.13	1.16	5.06	1.14
30	6.14	1.39	6.16	1.39	6.02	1.36	6.15	1.39	6.19	1.40	6.13	1.39

Water Pressure is fixed at 10 mH2O and Calculation F_{water} is 0.70 (Equation 6). The experimental results plug ball can water stopping at 15 second, Pump Pressure Average is 3.16 mH2O.

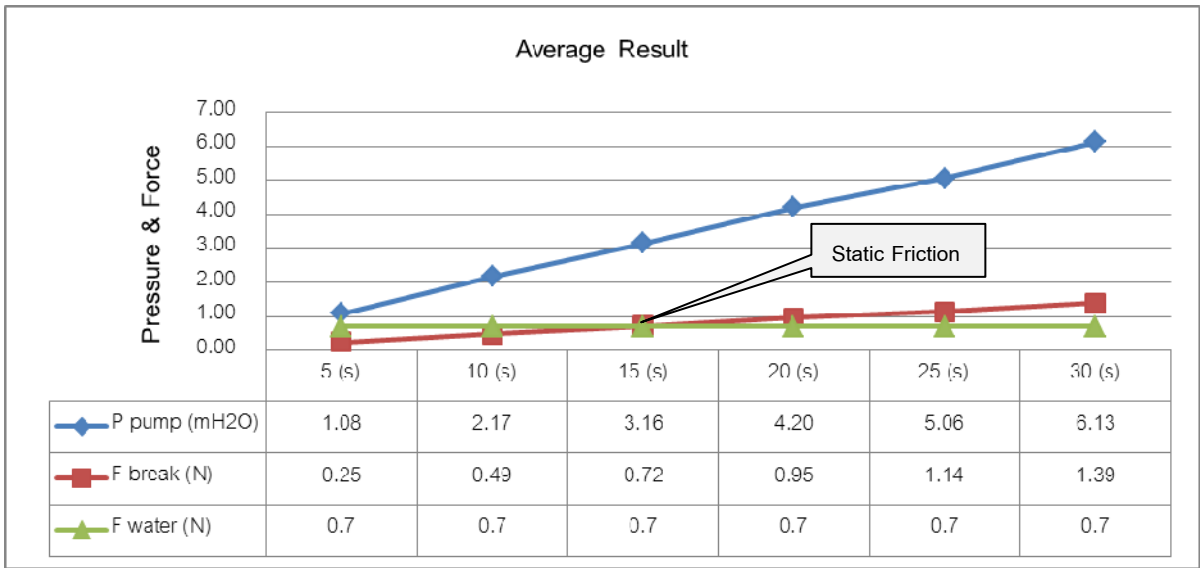


Figure 6 Average pressure and force of the system

จาก (Table 2) เมื่อตั้งค่าระบบท่อจำลองมีค่าแรงดันน้ำคงที่เท่ากับ 10 เมตรน้ำ ซึ่งค่า F_{water} จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.70 นิวตัน(สมการที่ 5) และเพิ่มแรงดัน P_{pump} ให้กับปลั๊กบอล โดย ณ เวลาที่ 15 วินาที มีค่าแรงดัน P_{pump} เฉลี่ยเท่ากับ 3.16 เมตรน้ำ และเริ่มหยุดน้ำได้ และค่า F_{break} มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.72 นิวตัน (สมการที่ 8) พบว่า ณ เวลาที่ 15 วินาทีนี้ F_{break} มีค่าใกล้เคียงกับ F_{water} ความหมายคือ ณ จุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของค่าแรงเสียดทานสถิต (Static friction) ปลั๊กบอลเริ่มหยุดน้ำภายในท่อได้ โดยแนวของแรงที่กระทำตามการวิเคราะห์ตามทฤษฎีกฎการเคลื่อนที่ข้อ 3 ของนิวตัน (Newton's third law of motion) กล่าวว่า"ทุกแรงกิริยา (action) ย่อมมีแรงปฏิกิริยา (reaction) ซึ่งมีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศตรงข้ามกันเสมอ" และเพิ่มแรงดัน P_{pump} จนถึงค่าเฉลี่ยที่ 6.13 เมตรน้ำ ได้ค่าเฉลี่ย F_{break} เท่ากับ 1.39 นิวตัน ซึ่งค่าแรงดันของปลั๊กบอล ณ จุดนี้ เป็นการ

กำหนดค่าความปลอดภัย Safety Factor มีค่าเท่ากับ 2 เท่าของ ณ จุดเริ่มต้นแรงเสียดทานสถิต หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง F_{break} มีค่ามากกว่า F_{water} ถึง 2 เท่า ดังนั้นอุปกรณ์หยุดน้ำภายในท่อจ่ายน้ำชั่วคราวสามารถหยุดน้ำภายในระบบท่อจ่ายน้ำชั่วคราวได้อย่างสมบูรณ์ โดยค่า μ (Table 1) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่นำมาคำนวณ โดยค่า μ ที่เสอดคล้องกับสภาพของท่อจริงของระบบท่อจ่ายน้ำ มีองค์ประกอบหลายปัจจัยมาเกี่ยวข้อง เช่น ความเรียบของผนังในท่อ อายุการใช้งานของท่อ และชนิดต่างๆของท่อ เป็นต้น โดยการศึกษามีข้อจำกัด แต่สามารถคำนวณหาค่า μ ที่สอดคล้องและแท้จริง ได้จากข้อมูลการทดสอบใช้งานภาคสนามของอุปกรณ์ในอนาคต

สรุป

จากการทดลองพบว่า ถ้าเพิ่มแรงดันของปลั๊กบอล ให้แรงเสียดทานสถิตที่ไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แล้ว F_{break} มีมากค่าเป็น 2 เท่า ของ F_{water} ที่เป็นแรงดันน้ำปกติ มีค่าความปลอดภัยสูงมากพอต่อการใช้งาน เพื่อหยุดน้ำภายในระบบท่อจ่ายน้ำชั่วคราวของการประปานครหลวง ตามทฤษฎีการวิเคราะห์แนวแรงกฎการเคลื่อนที่ข้อ 3 ของนิวตัน (Newton's third law of motion)และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ที่งานวิจัยนี้ได้อ้างอิงถึง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ฝ่ายบริหารจัดการน้ำสูญเสีย การประปานครหลวง ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ส่วนควบต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Farley, M. and Trow, S (2003) "**Losses in Water Distribution Networks – A Practitioner's Guide to Assessment, Monitoring and Control**". London : IWA Publishing

PETERSON. **Inflatable Pipe Plugs for Almost Any Application.** Avalible Sourse : http://www.petersenproducts.com/inflatable_plugs.aspx , Janualy 20, 2015.

Pronal ASIA-Manufacturing Elastomer Engineering. **Stopper>>UNIPLUG.** Avalible Sourse : http://www.pronalasia.com/product.php?menu=productshow&no=32&category_title=Stopper ,June 27, 2015.

Anthony Jones, Jonathan UPSDELL. 2014. **Piston Seal.** Oxford Nanopore Technologies Limited. EP2755703 A2

ฝ่ายสื่อสารองค์กร , การประปานครหลวง . 2557. **รายงานประจำปี 2557 (ฉบับร่าง)** .44

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของบ๊วยเค็มเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องขูดแยกเนื้อบ๊วยเค็มต้นแบบ

Study on Physical Properties for Design and Creation of Salted Plum Scrape Machine Prototype

สิทธิพร มณีวรรณ[1] สุดสายสิน แก้วเรือง[1*] บัญญัติ เศรษฐฐิติ[1] และ ศุภกิตต์ สายสุนทร[1]

Sittiporn Maneewan[1], Sudsaisin Kaewrueng[1*] , Bunyat Saitthiti[1] and Supakit Sayasoonthorn[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของบ๊วยเค็มเพื่อนำมาประกอบการออกแบบเครื่องขูดแยกเนื้อบ๊วยเค็มต้นแบบ เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของบ๊วยเค็มมีผลต่อการออกแบบชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง ทำให้เครื่องมีกลไกการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม การศึกษาสมบัติทางกายภาพของบ๊วยเค็มจะประกอบด้วย การวัดขนาดของผล เมล็ด น้ำหนัก และความชื้น ที่แท้จริงก่อนทำการทดสอบแรงเสียดทานและมุมกองของบ๊วยเค็ม จากการทดสอบพบว่า ผลบ๊วยเค็มและเมล็ดบ๊วยเค็ม มีน้ำหนักเฉลี่ยที่ 3.32 และ 1.08 กรัม ตามลำดับ องศาของมุมกองสำหรับการสร้างถังป้อนบ๊วยเค็ม คือมุม 60 องศา ค่าเฉลี่ยขนาดของผลบ๊วยเค็มและเมล็ดบ๊วยเค็มในการกำหนดระยะขูดระหว่าง ตะแกรงขูดและแกนกลางของ สกรูลำเลียง (Screw Conveyors) รวมไปถึงระยะห่างระหว่างสันของสกรูลำเลียง (Pitch) ในการลำเลียงบ๊วยเข้าสู่ระยะขูด ของเครื่องขูดแยกเนื้อบ๊วยเค็ม คือความกว้าง ยาว และหนา 21.9, 25.2, 16.6 มม.ตามลำดับ และ ค่าเฉลี่ยขนาดของเมล็ดบ๊วยเค็มที่ 13.2, 17.4, 0.99 มม. ตามลำดับ ค่าแรงเสียดทานของบ๊วยบนผิวสแตนเลส คือ 0.0689 นิวตัน จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องขูดแยกเนื้อบ๊วยเค็มต้นแบบ พบว่า ความเร็วรอบของเครื่องที่ให้ปริมาณเนื้อมากที่สุดและได้เมล็ดที่ขูดไม่สมบูรณ์น้อยที่สุดคือ 200-250 รอบต่อนาที

ABSTRACT

The physical properties of salted plum were studied to be attributed to the salted plum scrape machine prototype design. Therefore, the physical properties of salted plum affected the design components to maximize the appropriateness and the effectiveness of mechanisms work. The study of salted plum physical properties consisted of measuring the authentic size, weight and moisture of salted plum before the commencement of frictional force and pile angle of salted plum test. The study found that salted plum and salted plum seeds have average weights 3.32 and 1.08 grams, respectively. The pile angle for creating the hopper was 60 degrees. In the scraping period determination of scraper, core of the screw conveyors and the distance between the screw conveyors pitch in plum transporting into the scraping distance in the salted plum scrape machine had the average sizes of salted plum 21.9, 25.2 and 16.6 mm. in width, length and thickness, respectively, and the average sizes of salted plum seeds were 13.2, 17.4 and 0.99 mm respectively. The frictional force of plum on stainless steel was 0.0689 N. According to the salted plum scrape machine performance testing was found that between the 200-250 rpm speed yields the maximum meat quantity and minimum imperfect seeds.

Keywords: salted plum, scrape machine, plum physical property, plum peeler

*Corresponding author, e-mail address: **agrskr@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkhen Campus, Bangkok 10900

คำนำ

บ๊วย เป็นไม้ผลเขตหนาวที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Prunus mume Sieb.* et Zucc. ซึ่งอยู่ในวงศ์ Rosaceae บ๊วยมีรสชาติหวาน เค็ม เปรี้ยว ซึ่งนิยมนำมารับประทานกันอย่างแพร่หลาย และยังสามารถนำไปแปรรูปได้อีกมากมาย หลักๆ คือ “บ๊วยเค็ม” นิยมนำมาทานเล่น เชื่อกันว่ามีสรรพคุณช่วยคลายร้อน เพิ่มกำลัง บรรเทาอาการเหนื่อยอ่อนเพลีย ช่วยเสริมระบบการย่อยอาหาร และช่วยลดอุณหภูมิในร่างกาย (กัญจนา, 2533) หากดื่มน้ำบ๊วยเป็นประจำ จะช่วยป้องกันโรคติดเชื้อในระบบทางเดินอาหารได้อีกด้วย นอกจากนี้ผู้ที่ออกกำลังกายกลางแจ้ง หรือทำงานกลางแจ้ง ต้องหมั่นจิบน้ำเป็นประจำ เนื่องจากความร้อนจะทำให้ร่างกายเสียเหงื่อ ที่มีทั้งน้ำและเกลือแร่รวมอยู่ด้วย หากร่างกายขาดน้ำมากๆ อุณหภูมิภายในร่างกายจะเพิ่มสูงขึ้นอาจทำให้เกิดภาวะช็อกจากความร้อน หรือเป็นลมแดด/ฮีตสโตก (Heat stroke) (กัญจนา, 2533) ดังนั้นการเตรียมพร้อมตนเองก่อนที่จะออกแดดควรจิบน้ำบ่อยๆ สามารถป้องกันตนเองจากการเป็นลมแดดได้ และยังช่วยให้ร่างกายดูดซับน้ำไว้ได้ดีกว่าการดื่มน้ำครั้งละมากๆ นอกจากจะชดเชยด้วยการจิบน้ำแล้ว ยังต้องเติมเกลือแร่ให้กับร่างกายด้วย การดื่มเกลือแร่หรือกินบ๊วยเค็มที่มีโซเดียมพร้อมกับการดื่มน้ำแบบค่อยๆจิบ จะช่วยเติมเกลือแร่ให้ร่างกายได้ จากสรรพคุณที่กล่าวมา บ๊วยเค็มนั้นสามารถบริโภคได้ในหลายรูปแบบทั้งใน รูปผลแห้ง แช่อิ่ม บ๊วยสามรส บ๊วยหวาน และชงผสมน้ำดื่ม แต่ในการนำบ๊วยมาแปรรูปหรือนำมาผสมน้ำดื่มนั้นต้องมีการเฉือนเนื้อบ๊วยที่ติดอยู่รอบเมล็ด หรือบดย่อยทั้งผลแล้วแยกเนื้อบ๊วยออกจากเมล็ด กระบวนการดังกล่าวยังต้องใช้แรงงานคน ซึ่งทำได้ช้า ดังนั้นหากมีเครื่องมือที่สามารถขูดแยกเนื้อและเมล็ดของบ๊วยเค็มแห้งออกจากกันได้ จะทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว ลดการใช้แรงงานคน และสามารถเพิ่มกำลังการผลิตที่ตอบสนองต่อความต้องการของตลาดที่มีความต้องการเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน

วัสดุและอุปกรณ์

1. เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์
2. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล รุ่น ED4202S-CW
3. เครื่องอบลมร้อน (Hot air oven)
4. ชุดทดลองหามุมกองวัสดุแบบให้วัสดุก่อตัวบนผนัง (อนุชา และ จรัสพงษ์, 2545)
5. อุปกรณ์วัดแรงเสียดทาน
6. เครื่องวัดวัดความเร็วรอบ
7. อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ Toshiba VF-A5
8. บ๊วยเค็ม



(a)



(b)



(c)





(d) (e) (f)

Figure 1 Materials and equipments (a) Invertors (b) Digital scale (c) Pile angle measuring device (d) Tachometer (e) Vernier Calipers (f) Friction coefficient

วิธีการทดลอง

1. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของผลบ๊วยเค็ม

1.1 การวัดขนาดเมล็ด

ทำการสุ่มผลบ๊วยเค็มจำนวน 100 เมล็ด เพื่อนำมาวัดขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา ด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Figure 1 e) และชั่งน้ำหนักผลบ๊วยเค็มด้วยตาชั่งดิจิตอล (Figure 1 b) เมื่อเก็บข้อมูลของผลเสร็จแล้วจึงนำตัวอย่างทั้งหมดไปทำการขูดแยกเนื้อ และเมล็ดบ๊วยด้วยเครื่องต้นแบบ (Figure 2 b) ออกจากกัน หลังจากนั้นวัดขนาด ความกว้าง ความยาว และความหนาของเมล็ดบ๊วยเค็ม และทำการชั่งน้ำหนักด้วยเช่นเดียวกันกับการเก็บข้อมูลของผลบ๊วยแต่ละตัวอย่าง

1.2 การทดสอบความชื้น

การวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นของผลบ๊วยเค็ม โดยการอบลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

1.3 การวัดค่าแรงเสียดทาน

สำหรับการวัดแรงเสียดทาน ใช้อุปกรณ์วัดแรงเสียดทาน (Figure 1 f) ซึ่งสามารถปรับมุมเอียงได้ และมีพื้นเป็นสแตนเลสซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับถังบรรจุที่ใช้ในอุสาหกรรมอาหาร ทำการชั่งน้ำหนักผลบ๊วยเค็ม 10 กรัม จากนั้นนำไปวางบนพื้นของอุปกรณ์วัดแรงเสียดทาน เกลี่ยให้ผลบ๊วยเค็มกระจายทั่ว และค่อยๆ หมุนยกพื้นเอียงขึ้นจนกระทั่งผลบ๊วยเค็มเริ่มไถลลง มุมที่ผลบ๊วยเค็มเริ่มเกิดการไหล คือมุมที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานเริ่มต้นขึ้น ทำการทดสอบจำนวน 10 ซ้ำ และนำมุมที่ได้มาคำนวณหาค่าความเสียดทาน ได้ดังสมการที่ (1)

$$F = \mu N \qquad (1)$$

1.4 การวัดมุมกอง

ทำได้โดยเทผลบ๊วยเค็มใส่ในชุดทดสอบมุมกอง (Figure 1 c) วัสดุแบบให้วัสดุก่อตัวบนผนัง ซึ่งมีขนาด 20x20x30 เซนติเมตร จนได้ความสูง 20 เซนติเมตร จากนั้นเปิดฝาด้านหน้าของชุดทดสอบออกเพื่อให้ผลบ๊วยเค็มไหลออกได้ ซึ่งเมื่อผลบ๊วยเค็มหยุดไหลจะเหลือผลบ๊วยเค็มที่ก่อตัวอยู่บนผนังของชุดทดสอบ และอ่านค่ามุมบนผนังของชุดทดสอบ จะได้ค่ามุมกองตามธรรมชาติของผลบ๊วยเค็ม

2. การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

1.1 วัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบ เช่น เหล็กสำหรับทำโครงสร้าง เพลาสแตนเลส สแตนเลสเส้น ท่อ สแตนเลส ตะแกรงสแตนเลส สายพานลิ่ม ตลับลูกปืน เกียร์ทด มู่เลย์มอเตอร์ไฟฟ้า และอื่นๆ

1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบ เช่น เครื่องเชื่อมไฟฟ้า เครื่องเจียระไน เครื่องเจาะ เครื่องตัดเหล็ก และอื่นๆ

1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบเครื่องต้นแบบ เช่น อุปกรณ์วัดมุมกอง เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ นาฬิกาจับเวลา เครื่องชั่งดิจิตอล เครื่องวัดความเร็วรอบ อินเวอร์เตอร์ อุปกรณ์วัดแรงเสียดทาน และอื่นๆ

3. การทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบ

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบ โดยกำหนดความเร็วรอบที่ 50, 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 รอบต่อนาที โดยใส่ผลบ๊วยเค็มที่ 100 กรัม และบันทึกผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องขูดแยกเนื้อบ๊วยเค็มต้นแบบ คือ น้ำหนักเนื้อบ๊วย(กรัม) น้ำหนักเมล็ดที่ขูดสมบูรณ์(กรัม) น้ำหนักเมล็ดแตก (กรัม) และน้ำหนักผงเกลือ(กรัม) เมล็ดที่ขูดไม่สมบูรณ์(กรัม) และน้ำหนักของตัวอย่างที่ค้างในเครื่องต้นแบบ (กรัม)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

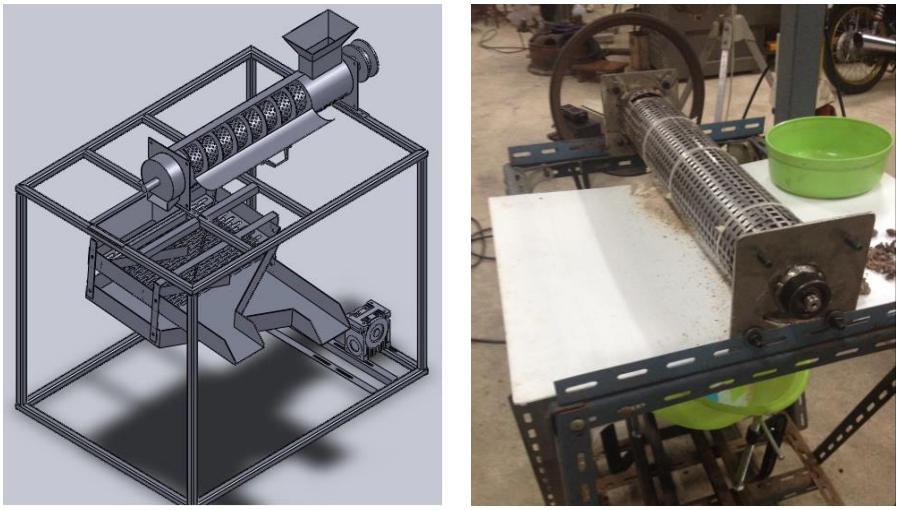
1. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของผลบ๊วยเค็ม

การแสดงสมบัติทางกายภาพของผลบ๊วยเค็มจากการ วัดขนาด ทดสอบความชื้น การวัดค่าแรงเสียดทานและการวัดมุมกอง ดังนี้ ขนาดของผลบ๊วยเค็มมีค่าเฉลี่ยของความกว้างของผลเท่ากับ 21.9 มม. (Table 1) ความกว้างเฉลี่ยของเมล็ดเท่ากับ 13.2 มม. (Table 1) ความยาวเฉลี่ยของผลเท่ากับ 25.2 มม. (Table 1) ความยาวเฉลี่ยของเมล็ดเท่ากับ 17.4 มม. (Table 1) ความหนาเฉลี่ยของผลเท่ากับ 16.6 มม. (Table 1) ความหนาเฉลี่ยของเมล็ดเท่ากับ 0.99 มม. (Table 1) จากสมบัติทางกายภาพดังกล่าวมีความสำคัญในการออกแบบเครื่องขูดแยกเนื้อบ๊วยเค็มต้นแบบ ให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด รวมไปถึงทดสอบแรงเสียดทานของผลบ๊วยเค็มกับสแตนเลส โดยเครื่องวัดแรงเสียดทานเอียงทำมุม 35.1 องศา (Table 1) มีค่าแรงเสียดทานเฉลี่ยเท่ากับ 0.0689 นิวตัน (Table 1) เป็นค่าที่มีความเหมาะสมกับวัสดุสำหรับนำมาสร้างเครื่องต้นแบบดังกล่าว (จิตพัฒน์และคณะ, 2545)

Table 1 The physical properties of salted plum from the experimental results of salted plum and salted plum seeds measurement.

order	Physical properties The average salinity of salted plum	salted plum	
		fruit	seed
1	Fruit size /seed(mm.)		
	Width	21.9	13.2
	Length	25.2	17.4
	Thickness	16.6	0.99
2	Weight (gram / 100 seeds)	3.32	1.08
3	Angle of stainless steel (degree)	35.1	-
4	Friction (N)	0.0689	-
5	Number of fruits/ 100 gram (fruit)	30	-
6	Moisture (% dry basis)	8.234	-
7	Pile angle (degree)	60	-

2. การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

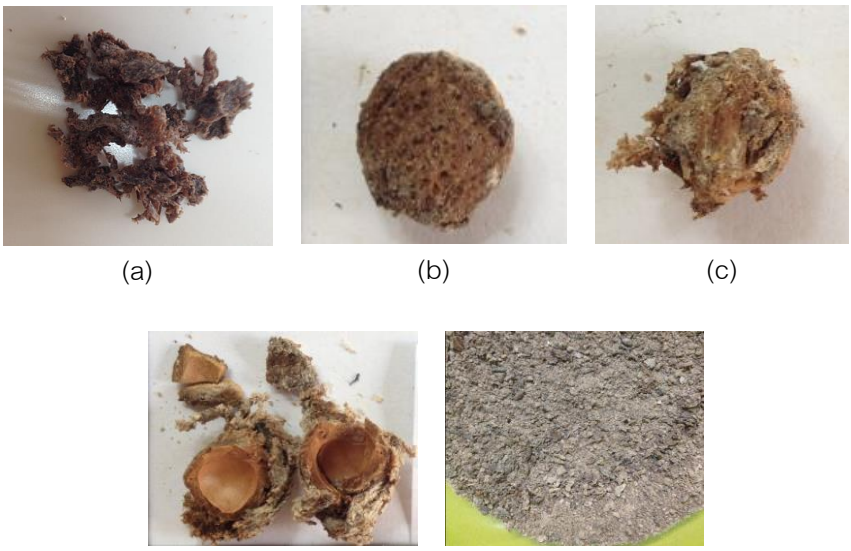


(a) (b)

Figure 2 The salted plum scrape machine prototype design (a) The salted plum scrape machine prototype (b).

3. การทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบ

จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบโดยกำหนดความเร็วรอบของเครื่องที่ 50, 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 รอบ/นาที โดยใส่ผลบ๊วยเค็มน้ำหนัก 100 กรัม สามารถแยกส่วนต่างๆ ของผลบ๊วยเค็มได้ทั้งหมด 5 ลักษณะ คือ เนื้อผล เมล็ดสมบูรณ์ เมล็ดขูดไม่สมบูรณ์ เมล็ดแตก และ ผงเกลือ (Figure 3)



(a) (b) (c)

(d) (e)

Figure 3 Characteristics of the scraped salted plum meat (a) scraped seed (b) uncompleted scrape seeds (c) broken grains (d) salt (e).

Table 2 The components of salted plum.

Components of salted plum (1 fruit)	Weight (%)
Meat	30
Seed	33
Salt	37

จากการทดสอบเพื่อหาสัดส่วนระหว่างเนื้อบ๊วย เมล็ดบ๊วย และผงเกลือ พบว่าผลบ๊วยเค็มมีส่วนประกอบของน้ำหนักเนื้อบ๊วย 30 % เมล็ดบ๊วย 33% และเป็นผงเกลือสูงถึง 37 % ดังแสดงใน (Table 2)

Table 3 The salted plum scrape machine performance test.

Speed (rpm)	Meat (gram)	Perfect seeds (gram)	Crack seeds (gram)	Imperfect seeds (gram)	Salt (gram)	Residues (gram)
50	14.28±1.56b	10.58±3.54b	30.19±6.02	5.51±1.96ab	34.18±1.34ab	4.13±1.13c
100	14.49±1.02b	7.57±1.23ab	29.50±4.54	7.53±5.21b	35.84±1.17abc	3.51±0.59bc
150	17.70±0.65c	10.72±2.24b	27.86±1.34	4.02±1.21ab	36.25±2.07bc	2.58±0.07ab
200	19.74±1.15cd	10.24±5.63b	26.49±5.76	1.40±0.74a	38.42±1.22c	2.98±1.04bc
250	21.03±1.23d	6.29±3.50ab	27.19±5.59	4.54±2.06ab	38.38±1.93c	1.65±0.31a
300	8.58±0.28a	4.01±1.18a	29.19±4.86	24.79±3.56c	32.73±1.14a	1.48±0.28a
350	10.09±1.82a	4.92±2.09ab	26.50±6.46	20.18±0.62c	35.83±2.53abc	1.43±0.77a
	*	*	ns	*	*	*

[1/] Means in the same column followed by difference letters are significantly difference (P≤ 0.05).

* Significance.

ns non-significance.

เมื่อทำการบันทึกน้ำหนักของลักษณะที่ได้ดังกล่าวตามรอบของความเร็ว 50, 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 รอบ/นาที มีค่าต่างๆ ดังนี้ เนื้อผล 14.28, 14.49, 17.70, 19.74, 21.03, 8.58 และ 10.09 กรัม ตามลำดับ เมล็ดสมบูรณ์ 10.58, 7.57, 10.72, 10.24, 6.29, 4.01 และ 4.92 ตามลำดับ เมล็ดขูดไม่สมบูรณ์ 5.51, 7.53, 4.02, 1.40, 4.54, 24.79 และ 20.18 กรัม ตามลำดับ เมล็ดแตก 30.19, 29.50, 27.86, 26.49, 27.19, 29.19 และ 26.50 กรัม ตามลำดับ ผงเกลือ 34.18, 35.84, 36.25, 38.42, 38.38, 32.73 และ 35.83 กรัม ตามลำดับ น้ำหนักค้างเครื่อง 4.13, 3.51, 2.58, 2.98, 1.65, 1.48 และ 1.43 กรัม ตามลำดับ (Table 3) จากผลการทดลองความเร็วรอบที่ทำให้ได้เนื้อผลบ๊วยมากที่สุดคือ ที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที รองลงมาคือ ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที แต่น้ำหนักที่ได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมากขึ้น เป็น 300 และ 350 รอบต่อนาที จะทำให้ได้น้ำหนักที่ลดลงและมีความแตกต่างกันทางสถิติ เช่นเดียวกันในเมล็ดสมบูรณ์ ที่ความเร็วรอบ 150 ให้น้ำหนักที่สูงที่สุดแต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับความเร็วรอบอื่นๆ ยกเว้นที่ 300 รอบต่อนาที เมล็ดแตกได้ค่าน้ำหนักสูงสุดที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที แต่ไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบอื่นๆ เมล็ดขูดไม่สมบูรณ์ น้ำหนักที่น้อยที่สุดคือที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีและแตกต่างทางสถิติกับค่าความเร็วรอบอื่นๆ (Table 3) จากค่าต่างๆที่ได้ พบว่า ค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมในการทำการงานของเครื่องขูดแยกเนื้อบ๊วยเค็มต้นแบบ คือ ที่ความเร็วรอบ 200 – 250 รอบต่อนาที เพราะให้ค่าน้ำหนักเนื้อมากและมีค่าน้ำหนักของเมล็ดขูดไม่สมบูรณ์น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบทางสถิติ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของผลบ๊วยเค็ม พบว่า มุมเอียงระหว่างผลบ๊วยเค็มบนผิวสแตนเลส คือมุม 35.1 องศา ขนาดความ กว้าง ยาว และหนาของผลบ๊วยเค็มโดยเฉลี่ยคือ 21.9, 25.2, 16.6 มม. และขนาดของเมล็ดบ๊วยเค็มโดยเฉลี่ยคือ 13.2, 17.4, 0.99 มม. ตามลำดับ ค่ามุมกองที่เหมาะสำหรับการสร้างถังป้อนผลบ๊วยเค็ม คือ 60 องศา ค่าแรงเสียดทานของบ๊วยบนผิวสแตนเลส คือ 0.0689 นิวตัน จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องขูดแยกเนื้อบ๊วยเค็มต้นแบบ พบว่า ความเร็วรอบของเครื่องที่ให้ปริมาณเนื้อมากที่สุดและได้เมล็ดที่ขูดไม่สมบูรณ์น้อยที่สุดคือ 200-250 รอบต่อนาที

เอกสารอ้างอิง

กัญจนา ดีวิเศษ, 2533. **น้ำสมุนไพร 108**. สถาบันการแพทย์แผนไทย กรมการแพทย์. กรุงเทพฯ.

จิตพัฒน์ พึ่งอาศรัยและคณะ, 2545. **เครื่องไสเนื้อบ๊วย**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.

อนุชา พิสุทธิพงษ์บูรณ์, จรัสพงษ์ พงษ์หิรัญนนท์, 2545. **การสร้างอุปกรณ์วัดมุมกองวัสดุ**. อุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพและประสิทธิภาพในงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วระหว่างการประปานครหลวงและบริษัทจ้างเหมา

Comparison of quality and efficiency of leaked pipe repair work between Metropolitan Waterworks Authority (In-house) and the subcontractor (Outsource)

ศุภพัชรี จิตระวัง[1*] และ ปิยนุช เวทย์วิวรณ์[1]

Suphapatcharee Jitrawang[1*] and Piyanut Wethyavivorn[1]

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการประปานครหลวงมีอัตราน้ำสูญเสียคิดเป็นร้อยละ 23.39 เพื่อลดอัตราน้ำสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการด้านน้ำประปา คุณภาพและประสิทธิภาพของการซ่อมท่อประปาแตกรั่วจึงมีความสำคัญในการลดอัตราน้ำสูญเสียได้ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและคุณภาพในงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วระหว่างการประปานครหลวง และบริษัทจ้างเหมา โดยทำการสำรวจความคิดเห็นของพนักงานส่วนซ่อมบำรุงรักษาระบบท่อและโยธาจำนวน 40 คน จาก 4 สาขา ได้แก่ แม้นศรี พญาไท ลาดพร้าว และประชาชื่น พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าการประปานครหลวงทำได้ดีกว่าบริษัทจ้างเหมาในด้านคุณภาพการบริการและความพร้อมของบุคลากร โดยเฉพาะการให้บริการประชาชนในการชี้แจงและประสานงานกับผู้ใช้น้ำ ตลอดจนประสบการณ์ ความรู้ และความชำนาญในงานซ่อมท่อของพนักงานการประปานครหลวง แต่ในด้านการดำเนินงาน และด้านคุณภาพน้ำและการสาธารณสุข บริษัทจ้างเหมากลับทำได้ดีกว่าโดยเฉพาะเรื่องของความเร็วในการดำเนินการซ่อมท่อให้แล้วเสร็จในเวลาสั้น รวมถึงการมีความพร้อมของเครื่องมือและอุปกรณ์ในจัดการน้ำสูญเสียระหว่างดำเนินการที่ดีกว่าการประปา

ABSTRACT

Metropolitan Waterworks Authority (MWA) currently losses 23.39 percent of the total water produced (non-revenue water). To decrease the non-revenue water and increase efficiency of waterworks service, quality and efficiency of leaked water pipe repair become vital. The study aims to compare the quality and efficiency in repairing broken/leaked pipe between MWA team (in-house) and the subcontractor (outsource). The data was gathered through the survey of 40 employees of Maintenance Division in 4 braches: ManSri, Phayathai, Ladprao and Prachachuen. The results revealed that MWA team is better in terms of quality of service and personnel readiness. MWA pays attentions to customer satisfaction more than the sub-contractor. MWA's staff also has more knowledge and experience than the subcontractor. However, the subcontractor was better in terms of operational readiness and water quality due to better tools and equipment.

Key Words: quality, efficiency, outsource, in house

* Corresponding author; e-mail address: **sjitrawang@gtmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การประปานครหลวง (กปน.) เป็นองค์กรรัฐวิสาหกิจ สังกัดกระทรวงมหาดไทย โดยรัฐบาลได้ออกพระราชบัญญัติการประปานครหลวง ให้โอนกิจการประปากรุงเทพ กรมโยธาเทศบาล การประปานนทบุรี การประปาเทศบาลนครธนบุรี และประปาเทศบาลสมุทรปราการ รวมเป็นกิจการเดียวกัน เรียกว่า *การประปานครหลวง* เมื่อวันที่ 16 สิงหาคม 2510 มีพื้นที่รับผิดชอบ 3,195 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ 3 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ โดยใช้แหล่งน้ำดิบจากสองแหล่งในการผลิตน้ำประปา คือ แม่น้ำเจ้าพระยา และแม่น้ำแม่กลอง มีโรงงานผลิตน้ำหลัก 4 แห่ง คือ โรงงานผลิตน้ำบางเขน มหาสวัสดิ์ สามเสนและธนบุรี สามารถผลิตน้ำประปาได้ถึงวันละ 5.60 ล้าน ลบ.ม. เพื่อรองรับการให้บริการแก่ประชาชนผู้ใช้น้ำจำนวน 2.175 ล้านราย โดยท่อประปาที่ใช้นั้นมีความยาวโดยประมาณ 32,000 กิโลเมตร (การประปานครหลวง, 2557) ดังนั้น เพื่อให้การบริหารจัดการระบบน้ำประปามีประสิทธิภาพสูงสุด การลดปริมาณน้ำสูญเสียให้มีปริมาณน้อยที่สุดจึงเป็นหนึ่งในนโยบายเพื่อตอบสนองต่อหลักการจัดการดังกล่าว ซึ่งในปัจจุบันการประปานครหลวงมีอัตราน้ำสูญเสียเฉลี่ยปี 2557 ประมาณร้อยละ 22.48 ซึ่งปริมาณน้ำสูญเสียนั้นมีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ น้ำสูญเสียที่เกิดจากความผิดพลาดของเครื่องวัดปริมาณน้ำและการขโมยใช้น้ำ อีกสาเหตุหนึ่งคือน้ำสูญเสียทางเทคนิคซึ่งเกิดจากน้ำสูญเสียพื้นฐาน การรั่วไหลในระบบจ่ายน้ำ และการแตกรั่วของท่อประปาอีกด้วย ซึ่งการแตกรั่วของระบบส่งท่อประปานั้น นับว่าเป็นสัดส่วนหลักของปริมาณน้ำสูญเสียทั้งหมด

สาเหตุของการแตกรั่วของท่อประปา

การแตกรั่วของท่อประปานั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและขนาดของท่อ สภาพแวดล้อมของแนวท่อนั้นๆ เป็นต้น สำหรับชนิดของท่อที่ใช้ในงานระบบท่อจ่ายน้ำและท่อบริการ (ท่อจ่ายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100-400 มม.และท่อบริการมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 25-75 มม.) ของการประปานครหลวงนั้น มี 4 ชนิดหลักๆคือ

1. PVC (Polyvinyl Chloride) นิยมใช้ขนาดตั้งแต่ 100-400 มม. สำหรับท่อจ่ายน้ำก่อนบรรจบเข้าท่อบริการตามบ้านพักอาศัย ซึ่งง่ายในการเชื่อมต่อและใช้พื้นที่น้อยในการตัดบรรจบ

2. AC (Asbestos Cement) มีขนาดตั้งแต่ 100-400 มม. ใช้สำหรับท่อจ่ายน้ำปัจจุบันไม่นิยมใช้งานเพราะอายุการใช้งานที่น้อย และแตกรั่วง่าย

3. GI (Galvanized Iron) มีขนาดตั้งแต่ 40-150 มม. ใช้ทั้งท่อจ่ายและท่อบริการเป็นท่อยุคแรกที่ใช้งาน ปัจจุบันไม่นิยมเนื่องจากการผุกร่อนของท่อ ซึ่งไม่สอดคล้องกับนโยบาย “น้ำประปาดื่มได้” ของ กปน.

4. PB (Polybutylene) มีขนาดตั้งแต่ 20-150 มม. ใช้สำหรับท่อบริการต่อจากท่อจ่ายน้ำจนถึงมาตรวัดน้ำประปาของผู้ใช้น้ำซึ่งมีความทนทานและยืดหยุ่นสูง นิยมใช้ขนาด 20-50 มม.

สถิติการแตกรั่วของท่อประปา

สถิติการแตกรั่วของท่อประปานั้นมาจากท่อรั่วบนดินและท่อรั่วใต้ดิน โดยท่อรั่วบนดินและใต้ดินสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

1. ท่อรั่วบนดิน หมายถึงท่อรั่วที่มองเห็นน้ำรั่วที่ผิวดินหรือผิวจราจร ไม่ว่าท่อที่รั่วนั้นจะอยู่บนดินหรือฝังอยู่ใต้ดินก็ตาม มักจะเกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีท่อระบายน้ำทิ้ง ไม่มีทางเท้า-ไหล่ทาง และดิน เป็นจำพวกที่ไม่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ เช่น ดินเหนียว ดินที่ใช้ในการทำแบบพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งในกรณีนี้จะมีปริมาณน้ำสูญเสียน้อยหากรีบทำการซ่อม แม้ว่าจุดรั่วจะเกิดขึ้นบ่อย เพราะสามารถตรวจพบได้ง่าย ทำให้ซ่อมได้อย่างรวดเร็ว

2. ท่อรั่วใต้ดิน หมายถึงท่อรั่วที่มองไม่เห็นน้ำที่รั่ว เพราะน้ำนี้จะไหลลงสู่ใต้ดินหรือไหลลงสู่ท่อระบายน้ำ เป็นต้น และส่วนใหญ่จะเกิดกับท่อที่วางฝังไว้ใต้ดิน จึงต้องใช้เทคนิคพร้อมทั้งประสบการณ์ และเครื่องมือสำรวจหาท่อรั่ว เพื่อค้นหาตำแหน่งรั่ว มักจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีท่อระบายน้ำทิ้ง ใต้ทางเท้า-ไหล่ทาง น้ำที่รั่วจะไหลลงท่อระบายหรือไหลลงสู่

แอ่งน้ำลำคลอง หรือซึมลงสู่ใต้ดิน และดินเป็นจำพวกกรวด ทราย เป็นต้น ซึ่งในกรณีของท่อรั่วใต้ดินนั้นปริมาณน้ำสูญเสียค่อนข้างมาก แม้ว่าจุดรั่วจะเกิดขึ้นน้อยกว่าท่อรั่วบนดินก็ตามเนื่องจากตรวจพบยาก ทำให้การรั่วไหลเป็นไปอย่างต่อเนื่องยาวนาน

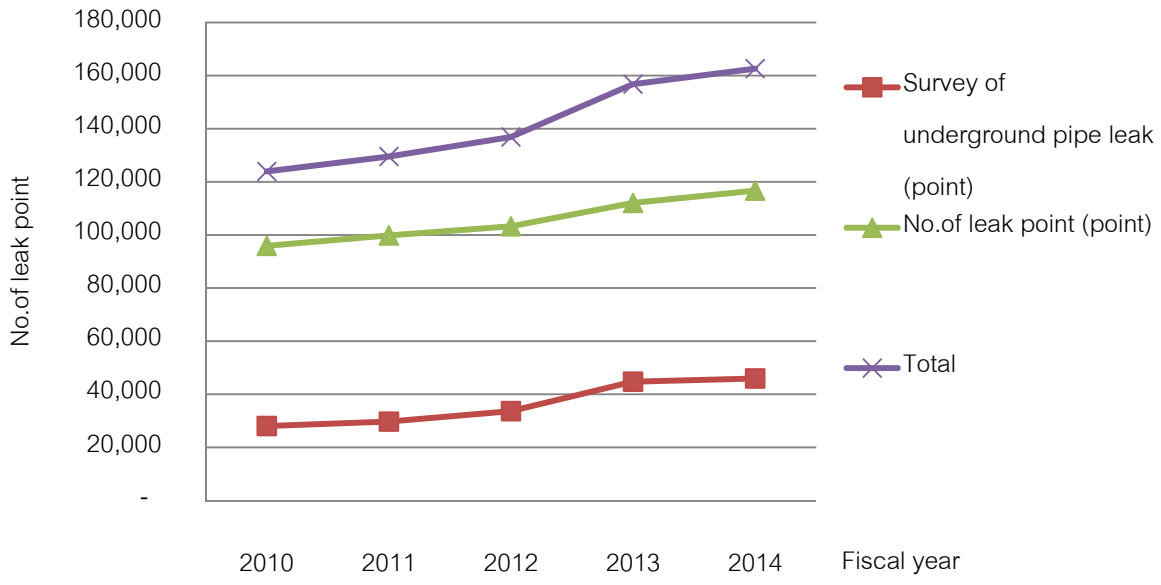


Figure 1 Statistic of leak points from fiscal year 2010-2015

จำนวนจุดแตกรั่วตั้งแต่ปีงบประมาณ 2553-2557 พบว่ามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราน้ำสูญเสียของการประปานครหลวง ทำให้ประชาชนผู้ใช้น้ำได้รับผลกระทบเรื่องแรงดันน้ำไหลอ่อน และยังส่งผลให้รายได้ของการประปานครหลวงลดลงอีกด้วย

น้ำสูญเสีย

น้ำสูญเสีย (Water loss) มีการให้ความหมายและคำจำกัดความโดยหลายหน่วยงาน ซึ่งแตกต่างกันออกไปแล้วแต่มุมมอง ข้อกำหนด และการนำไปใช้ของหน่วยงานนั้นๆ องค์การอนามัยโลกซึ่งเป็นหน่วยงานสากลได้มีการกำหนดคำจำกัดความของน้ำสูญเสียในกิจการประปาไว้ว่า *"น้ำสูญเสียคือปริมาณน้ำในระบบท่อประปาที่สูญหายไปโดยไม่สามารถระบุปริมาณ เวลา และ สถานที่"*

การประปานครหลวง กำหนดวิธีการวัดปริมาณน้ำสูญเสียเพื่อนำไปใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพการดำเนินงานขององค์กรเองเช่นเดียวกับกิจการประปาอื่นๆ ทั่วโลก โดยตัวชี้วัดประสิทธิภาพน้ำสูญเสียที่การประปานครหลวงเลือกใช้คือ อัตราน้ำสูญเสีย (Unaccounted For Water: UFW) ซึ่งหมายถึง

ปริมาณน้ำสูญเสีย = ปริมาณน้ำสูบจ่าย – ปริมาณน้ำจำหน่าย

โดย ปริมาณน้ำสูบจ่าย หมายถึง ปริมาณน้ำสูบจ่ายจากสถานีสูบจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบท่อ

ปริมาณน้ำจำหน่าย หมายถึง ปริมาณน้ำที่ขายได้จริง (จากการออกบิล) รวมกับปริมาณน้ำที่ใช้ในการสาธารณะประโยชน์ต่างๆ โดยไม่ได้คิดเงินซึ่งนำมาจัดทำเป็นข้อมูลตัวชี้วัดประสิทธิภาพน้ำสูญเสีย คือ %UFW โดยสมการคำนวณดังนี้

อัตราน้ำสูญเสีย)%) = (ปริมาณน้ำสูญเสีย / ปริมาณน้ำสูบจ่าย) x 100%

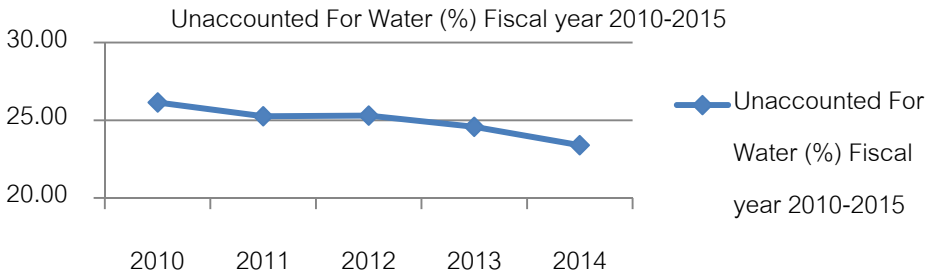


Figure 2 Statistics of Unaccounted For Water (%) Fiscal year 2010-2015

จากข้อมูลจำนวนจุดรั่วที่พบของการประปานครหลวงตั้งแต่ปีงบประมาณ 2553-2557 (Figure 1) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นและสถิติของปริมาณอัตราน้ำสูญเสียของปีงบประมาณ 2553-2557 (Figure 2) นั้นมีแนวโน้มที่ลดลง ทำให้ปริมาณน้ำขายของการประปานครหลวงเพิ่มขึ้น ดังนั้นงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วจึงนับว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อการให้บริการน้ำประปาแก่ประชาชนที่พักอาศัย องค์กรและสถานที่ราชการต่างๆ และยังส่งผลกระทบต่อรายได้ของการประปานครหลวงอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

กลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยครั้งนี้เป็นการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง (Sample) โดยกลุ่มตัวอย่างเป็นพนักงานจากส่วนซ่อมบำรุงระบบท่อและโยธา กองบำรุงรักษา ที่เคยทำงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วกับทั้งกองงานของการประปานครหลวงและกองงานของบริษัทจ้างเหมา จาก 4 สำนักงานประสาขา ได้แก่ สำนักงานประปาสาขาแม้นศรี สำนักงานประปาสาขาประชาชื่น สำนักงานประปาสาขาลาดพร้าวและสำนักงานประปาสาขาพญาไท จำนวน 40 คน

เครื่องมือการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ทำการวิจัยคือ แบบสอบถามเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและคุณภาพในงานซ่อมท่อประปาแตกรั่ว ซึ่งการทำแบบสอบถามในการวิจัยครั้งนี้ ผู้ทำการวิจัยได้นำรายละเอียดของดัชนีชี้วัด(Performance Indicator) มาจากแบบประเมินภายในงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วของการประปานครหลวง จำนวน 11 ข้อ เช่น พนักงานมีความทุ่มเทและตั้งใจในการทำงาน พนักงานมีความสามารถในการตัดสินใจหน้างาน และพนักงานให้ความร่วมมือในการทำงานเป็นอย่างดี เป็นต้น การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review) เกี่ยวกับมาตรฐานงานประปา จำนวน 126 ข้อ เช่น ความยาวของท่อประปาที่ทำการวางใหม่ ความครอบคลุมของการจ่ายน้ำ และจำนวนเรื่องร้องเรียนด้านคุณภาพน้ำ เป็นต้น

ขั้นตอนการคัดกรองดัชนีชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วนั้น ได้จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญงานซ่อมท่อประปาแตกรั่ว จำนวน 5 คน ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นบุคคลที่เคยปฏิบัติงานในกองงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วด้วยตนเอง
2. เป็นผู้ควบคุมงานซ่อมท่อประปาแตกรั่ว
3. มีประสบการณ์ในงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วมากกว่า 20 ปี

จากการคัดกรองดัชนีชี้วัดของผู้เชี่ยวชาญพบว่า จำนวนดัชนีชี้วัดที่ได้มีจำนวน 29 ข้อ และผู้เชี่ยวชาญเพิ่มข้อเสนอแนะอีกจำนวน 8 ข้อ ดัชนีชี้วัดที่ได้ทั้งหมดที่นำไปใช้ในแบบสอบถามคือ 37 ข้อ

แบบสอบถามสำรวจเปรียบเทียบประสิทธิภาพและคุณภาพระหว่างการประปานครหลวงและบริษัทจ้างเหมาในงานซ่อมท่อประปาแตกรั่ว แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1: ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผู้ตอบแบบสอบถาม

ส่วนที่ 2: เปรียบเทียบความพึงพอใจต่องานซ่อมท่อประปาแตกรั่วระหว่างการประปานครหลวง (กปน.) และบริษัทจ้างเหมา ลักษณะของแบบสอบถามถามถึงการประเมินเปรียบเทียบความรู้สึก หรือความคิดเห็น โดยกำหนดตัวเลือก 5 ระดับดังนี้

5 หมายถึง มากที่สุด 4 หมายถึง มาก 3 หมายถึง ปานกลาง

2 หมายถึง น้อย 1 หมายถึง น้อยมาก

ส่วนที่ 3: ข้อเสนอแนะต่างๆ

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางในการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นโดยใช้ค่าสถิติบรรยาย (Descriptive statistics) เพื่อให้ทราบค่าความถี่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้โปรแกรม SPSS for Windows

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ผลการศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 40 คน เป็นเพศชาย ร้อยละ 97 และเพศหญิง ร้อยละ 3 มีช่วงอายุต่ำกว่า 30 ปี ร้อยละ 15 ช่วงอายุ 30-40 ปี ร้อยละ 60 ช่วงอายุ 40-50 ปี ร้อยละ 20 และช่วงอายุ 51-60 ปี ร้อย 5 ซึ่งประกอบไปด้วยตำแหน่งที่มากที่สุดคือ ช่าง (ระดับ 2-5) ร้อยละ 65 รองลงมาคือ วิศวกร ร้อยละ 25 และมีประสบการณ์การทำงานมากที่สุดคือ 1-5 ปี ร้อยละ 70 รองลงมาคือ 16-20 ปี (รายละเอียดดังภาพที่ 3)

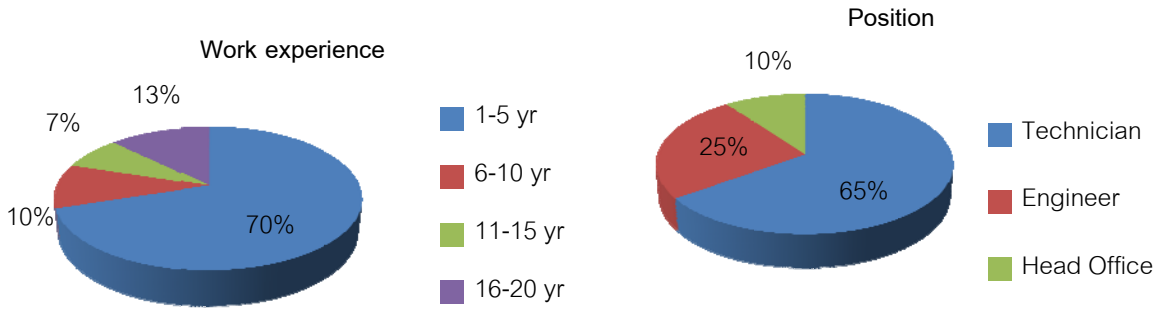


Figure 3 The chart of work experience and position of the Sample

ข้อมูลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและคุณภาพของงานซ่อมท่อประปาแตกรั่ว

ผลการศึกษาการเปรียบเทียบความพึงพอใจต่องานซ่อมท่อประปาแตกรั่วระหว่างการประปานครหลวงและบริษัทจ้างเหมานั้น พบว่าหมวดหมู่ตาม Table 1 ที่มีความต่างของค่าเฉลี่ยมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด ได้แก่ คุณภาพของการบริการ 0.45 บุคลากร 0.26 การดำเนินงาน -0.16 และคุณภาพน้ำและการสาธารณสุข -0.17 ตามลำดับ ส่วนดัชนีชี้วัดที่มีความต่างของค่าเฉลี่ยเรียงลำดับจากมากที่สุดไปน้อยที่สุด ได้แก่ เรื่องร้องเรียนจากการให้บริการด้านคุณภาพและ

เทคนิค 1.08 พนักงานมีมารยาทที่ดีในการชี้แจงและประสานงานกับผู้ใช้น้ำ 1.08 พนักงานวัดค่าคลอรีนในน้ำประปาหลังแล้วเสร็จงานซ่อมท่อประปาทุกครั้ง 1.05 พนักงานให้บริการถาม-ตอบ และให้ความช่วยเหลือแก่เบื้องต้นผู้ใช้น้ำทางโทรศัพท์ 0.85 ประชาชนได้รับการบริการงานซ่อมท่อประปาแตกรั่วอย่างทั่วถึง 0.83 และ พนักงานมีประสบการณ์ความรู้ และความชำนาญในงานซ่อมท่อ 0.80 ตามลำดับ

Table 1 Mean and Differentiate between MWA and Sub-contractor

No.	Performance Indicators	Mean (Sub.)	Mean (MWA.)	Diff.	Ranking
	Group 1: Quality of service	**3.37**	**3.82**	**0.45**	*
1	Staff has the good manners to coordinate and clarify with the client	3.33	4.40	1.08	1
2	A complaint of quality and technical services.	2.73	3.80	1.08	1
3	Staff could provide the troubleshooting through telephone services to the client	3.55	4.40	0.85	2
4	Client could get repairing leaky water pipe services thoroughly	3.15	3.98	0.83	3
5	The number of complaints become lower	3.30	3.95	0.65	5
6	The staff are polite and courteous to the client	3.53	4.13	0.60	6
7	Staff quickly arrives to the leak point after notified.	3.43	3.88	0.45	8
8	No. of complaints about water quality	3.05	3.48	0.43	9
9	The shutdown of the water system more than 12 hours.	2.98	3.40	0.43	9
10	Staff provided a better service and continuity.	3.48	3.83	0.35	11
11	Staff can clarify the problem of pipe repair to the client	3.80	4.08	0.28	12
12	The number of illegal to the assets of MWA	3.45	3.53	0.07	19
13	A Complaint of Quality of service	3.50	3.53	0.02	20
14	The No. of complaints caused by low water pressure	3.45	3.43	-0.02	21
15	Staff communicated with the client all over the area when shut down the water system	3.88	3.53	-0.35	24
	Group 2: Personnel	**3.91**	**4.17**	**0.26**	**
1	Staff are the experience, knowledge and expertise to repair the pipe.	3.60	4.40	0.80	4
2	Staff are able to solve unexpected problems	3.83	4.10	0.28	12
3	The staff is a responsibility to repair the pipe	4.00	4.25	0.25	14
4	The staff is dedicated and willing to work.	4.00	4.23	0.23	15
5	Staff are the ability to coordinate with other agencies.	3.90	4.08	0.18	16
6	Staff cooperate in working as well.	4.13	3.98	-0.15	23
	Group 3: Operational	3.65	3.49	-0.16	***
1	No. of pipe repair in one day.	3.35	3.85	0.50	7

No.	Performance Indicators	Mean (Sub.)	Mean (MWA.)	Diff.	Ranking
2	Staff is working on the MWA standard of pipe repair.	3.68	4.05	0.38	10
3	The availability of staff for a group	3.58	3.68	0.10	17
4	Clearing and cleaning the construction area after the pipe repair including preparing the sign board to prevent an accident	3.73	3.80	0.07	19
5	The availability and suitable of equipment and machine for the job	3.40	3.33	-0.08	22
6	The availability of the signboard with the detail about to the repair road surface	3.75	3.25	-0.50	26
7	Time average of pipe repair start from notified until finish more than 4 hrs/client	3.68	3.18	-0.50	26
8	The availability and reserve of tools and equipment for pipe repair	3.95	3.23	-0.72	28
9	The availability sign board, sign signal and the net cover the construction area	3.78	3.05	-0.73	29
	Group 4: Water quality and Public health	**3.48**	**3.31**	**-0.17**	****
1	Water loss management system	3.08	3.53	0.45	8
2	The amount of water loss in control while repairing the pipe leak.	3.53	3.80	0.27	13
3	Staff measured the water quality after pipe repair	3.25	3.33	0.08	18
4	Staff Blow off the water after pipe repair	3.75	3.83	0.07	19
5	The availability of tools and equipment that use to measure water quality	3.60	3.20	-0.40	25
6	Staff measured the turbidity (NTU) after pipe repair	3.50	2.90	-0.60	27
7	Staff measure the chlorine in water after pipe repair	3.68	2.63	-1.05	30

สรุป

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและคุณภาพระหว่างการประปานครหลวงและบริษัทจ้างเหมาในงานซ่อมท่อของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 40 คน จาก 4 สาขา พบว่า หมวดหมู่ที่มีความต่างของค่าเฉลี่ยมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด ได้แก่ คุณภาพของการบริการ 0.45 บุคลากร 0.26 การดำเนินงาน -0.16 และคุณภาพน้ำและการสาธารณสุข -0.17 ตามลำดับ

จากผลการสำรวจของกลุ่มตัวอย่างดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ข้อดีของการประปานครหลวงในการบริหารจัดการงานซ่อมท่อนั้น คือ มีบุคลากรที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ และมากด้วยประสบการณ์ในงานซ่อมท่อประปาแตกรั่ว อีกทั้งมีความทุ่มเทใส่ใจในงานบริการแก่ประชาชนผู้ใช้น้ำด้วย แต่ขาดความพร้อมเพรียงของอุปกรณ์และเครื่องมือ รวมถึงกำลังพล และระยะเวลาในการซ่อมค่อนข้างนาน ซึ่งอุปสรรคเรื่องดังกล่าวนั้นเกิดจากงบประมาณ เนื่องจากการของบประมาณ

ในการจัดซื้อจัดจ้างแต่ละครั้งมีระยะเวลาในการขอค่อนข้างนาน และมีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อน สำหรับข้อดีของบริษัทจ้างเหมาในการบริหารจัดการงานซ่อมท่อ คือ ความพร้อมเพรียงของอุปกรณ์ เครื่องมือ และกำลังพล รวมถึงระยะเวลาในการซ่อม ซึ่งซ่อมได้ค่อนข้างเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการประปานครหลวง แต่บุคลากรของบริษัทจ้างเหมายังขาดในเรื่องของการบริการด้วยหัวใจ (Service Mind) เนื่องจากยังขาดความรู้ความเข้าใจอันดีต่องานบริการ

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาพบว่า ภาพรวมของผลงานวิจัยยังอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน หากมีการวิจัยครั้งต่อไป ขอเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. ควรมีการสัมภาษณ์กลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในระดับบริหารตั้งแต่ระดับ 7 อันได้แก่ ตำแหน่งผู้อำนวยการ ผู้จัดการสาขา ผู้ช่วยผู้ว่าการประปานครหลวง รองผู้ว่าการประปานครหลวง ตามลำดับ เพื่อให้ได้ข้อมูลและมุมมองในระดับบริหาร

2. ควรมีการเก็บข้อมูลด้วยการลงพื้นที่บริเวณจุดงานจริงกับทั้งหน่วยงานของการประปานครหลวงและบริษัทจ้างเหมา เพื่อให้ได้ข้อมูลจริงและเป็นปัจจุบัน

3. ควรมีการเพิ่มจำนวนสาขาและจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ศึกษาเพื่อเพิ่มรายละเอียดและข้อเสนอแนะของงานวิจัยอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักประปาสาขาต่างๆ และหน่วยงานภายในอื่นๆของการประปานครหลวงที่ได้ให้การสนับสนุนทางด้านข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาและวิเคราะห์การวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

ACEA benchmarking experiences in water services in Latin America. **Journal of Water Supply Research and Technology – AQUA** 57(4):273-278.

Nurnberg, W.H. 2001. **Performance assessment of water supply systems.** German National Report, IWA-World Water Congress-Berlin.

Ojo, V.O. 2011. **Customer satisfaction: a framework for assessing the service quality of urban water service providers in Abuja Nigeria.** A Doctoral Thesis, Loughborough University.

Pacific Water and Wastewater Association. 2012. **Pacific water and wastewater utilities – Benchmarking Report.**

Palme, U., and Tillman A. 2008. Sustainable development indicators: how are they used in Swedish water utilities. **Journal of Cleaner Production** 16:1346-1357.

Rahill-Marier B., and Lall U. 2010. **America's water: An exploratory analysis of municipal water survey. American Water Works Association (AWWA)**, United States.

การศึกษาผลของการใช้เชื้อเพลิงควบคู่ระหว่างถ่านอัดแท่ง และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด สำหรับเตาชีวมวลชนิดไหลขึ้น

Updraft co-gasification of wood pellet and charcoal effect of fuel mixing on important parameters

ปฤษธฤต สารพร[1*], ภัทรพงษ์ คงได้[1] ,วิชัย ศิวะโกศิษฐ[1] และ ชินธันย์ อารีประเสริฐ[1]

Prysathryd Sarabhorn[1*], Pattarapong Kongdai[1], Wichai[1], Siwakosit[1] and Chinnathan Areeprasert[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของการใช้เชื้อเพลิงควบคู่ระหว่างถ่านอัดแท่ง และเชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ด สำหรับเตาชีวมวลชนิดไหลขึ้น ต่อประสิทธิภาพในเชิงความร้อน และผลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากเตาชีวมวล วางแผนการทดลองโดยการแบ่งกลุ่มเชื้อเพลิงออกเป็นสามกลุ่ม ได้แก่ ถ่านอัดแท่ง เชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ด และเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านอัดแท่งและชีวมวลไม้อัดเม็ด พบว่าชีวมวลไม้อัดเม็ดจะให้อุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุด แต่มีการเผาไหม้ได้เร็ว ลักษณะของการจุดแก๊สผลิตภัณฑ์จะเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ถ่านอัดแท่งจะให้อุณภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดแต่เผาไหม้ได้ช้ากว่า แต่ลักษณะของไฟจากแก๊สผลิตภัณฑ์จะเผาไหม้ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับชีวมวลไม้อัดเม็ด เมื่อนำไปทำการทดลองใช้ในเตาชีวมวล พบว่ามีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นกว่าการใช้ชีวมวลไม้อัดเม็ดเพียงอย่างเดียวและสามารถเผาไหม้ได้เร็วขึ้น มีระยะเวลาในการจุดติดไฟโดยรวมเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า และจำนวนครั้งในการจุดติดไฟเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า และสามารถเผาไหม้ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ชีวมวลไม้อัดเม็ดเพียงอย่างเดียว จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ดร่วมกับถ่านอัดแท่งน่าจะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาผลิตแก๊สชีวมวล

ABSTRACT

This study presents an investigation on the effect of fuel mixing during updraft co-gasification of wood pellet and woody charcoal focusing on the important parameters. Results showed that the nominal temperature during wood pellet gasification was lower than that of the charcoal. However, its burnout time was relatively shorter than that of the charcoal. The ignition of syngas from wood pellet was incomplete since it showed the volatile or smoke during the combustion test. Produced gas from charcoal had significantly better performance on combustion testing. Moreover, when mixing charcoal with wood pellet, the duration of ignitable was increased around four times and the syngas of the mixture can be ignited much easier (three times better) compared to the syngas of wood pellet. Thus, it could be said that adding charcoal to wood pellet gasification would have better gasification performance.

Key Words: gasification, updraft gasifier, charcoal, wood pellet, co-gasification

* Corresponding author; e-mail address: palmbsz@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

พลังงานเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญในการดำรงชีวิตขั้นพื้นฐานของมนุษย์ และยังมีความสำคัญในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ประเทศไทยไม่ได้มีแหล่งพลังงานเชิงพาณิชย์ที่มากเพียงพอต่อความต้องการภายในประเทศทำให้ต้องมีการพึ่งพาแหล่งพลังงานเชิงพาณิชย์จากต่างประเทศ ซึ่งมีมูลค่าค่อนข้างสูง โดยมูลค่าการนำเข้าพลังงานในปีพุทธศักราช 2557 อยู่ที่ 1,399 พันล้านบาท (ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน, 2558) จึงมีการมองหาพลังงานทางเลือกเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานในเชิงพานิชย์ลง และด้วยความที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีพื้นที่ที่ใช้ประโยชน์ในเชิงเกษตรกรรมมากกว่า 149 ล้านไร่ในปีพุทธศักราช 2554 (สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรก็คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย กาก ใย และทะลายปาล์ม เป็นต้น ชีวมวล (Biomass) หมายถึง วัสดุหรือสารประกอบอินทรีย์ของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานได้ เช่น ไม้ฟืน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่น ๆ รวมถึงการนำมูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางเกษตร มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเชิงความร้อนโดยตรงหรืออาศัยกระบวนการทางเคมีเพื่อผลิตแก๊สชีวมวล ซึ่งเตาผลิตแก๊สชีวมวลก็เป็นหนึ่งในกระบวนการเปลี่ยนรูปจากเชื้อเพลิงโดยกระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลเป็นการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งเป็นเชื้อเพลิงก๊าซชีวมวลในสภาวะการเผาไหม้แบบอับอากาศ (นิติ รงค์, 2555) โดยขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวมวล ภายในเตาชีวมวลจะแบ่งโซนปฏิกิริยายาภายในห้องเผาไหม้ประกอบไปด้วย ปฏิกิริยาการเผาไหม้ (combustion) ปฏิกิริยา รีดักชั่น (reduction) ไพโรไลซีส (pyrolysis) และการอบแห้ง (drying) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาในรูปของแก๊ส ซึ่งจะมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวมวล ได้แก่ ชนิดและขนาดของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าเตาความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเชื้อเพลิงแต่ละชั้น (วิชัย, 2010) โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงผลที่ได้จากการใช้เชื้อเพลิงตัวอย่างสองชนิด และตัวอย่างที่ผสมกันของชนิดเชื้อเพลิงทั้งสอง ในที่นี้คือเชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ด (Wood pellet) และถ่านอัดแท่ง ในการทดลองและสังเกตความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของแต่ละโซนปฏิกิริยา ระยะเวลาในการเผาไหม้ การจุดติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์ รวมถึงลักษณะเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ เพื่อวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมในการใช้เชื้อเพลิงแบบผสมสำหรับเตาชีวมวลแบบไหลขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

เชื้อเพลิง

สำหรับในการศึกษานี้ใช้ชนิดของเชื้อเพลิงสองชนิดคือ เชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ด (Wood Pellet) เป็นเศษไม้ที่ผ่านการย่อยบดและอัดขึ้นรูป ซึ่งได้รับจากบริษัท เพาเวอร์ เพลเลท จำกัด ชิ้นเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวอยู่ที่ 6 และ 40 มิลลิเมตรตามลำดับ และเชื้อเพลิงอีกชนิดคือถ่านไม้โกงกางผสมถ่านกะลาอัดแท่ง (Charcoal) ซึ่งผลิตในท้องที่ของจังหวัดสงขลา มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวอยู่ที่ 10 และ 100 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยถ่านอัดแท่งจะถูกเตรียมและคัดแยกให้มีขนาดความยาวไม่เกิน 60 มิลลิเมตร สำหรับการทดลองในครั้งนี้ ในส่วนของคุณสมบัติเชิงเคมีและคุณสมบัติเชิงความร้อนระบุไว้ตามตาราง Table 1

Table 1 Fuel properties

Description	Wood pellet	Charcoal	Mix fuel*
Proximate analysis (as received basis, wt. %)			
moisture	8.8	6.6	7.7
fixed carbon	11.2	52.8	32
volatile matter	76.8	29.2	53
ash	3.2	11.3	7.3
Ultimate analysis (dry basis, wt. %)			
carbon	44.3	58.4	51.4
hydrogen	6.2	3.6	4.9
nitrogen	0.2	0.4	0.3
oxygen	46.1	26.3	36.1
Heating value (dry basis, MJ/kg)			
higher heating value	17.9	23.4	20.7

* Oxygen was calculated by difference (Oxygen = 100 – (C + H + N + ash)).

** All value was calculated by weighted-average.

เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล

เตาที่ใช้เป็นเตาชีวมวล (Gasifier) แบบไหลขึ้น (Updraft) ชนิดฟิกซ์เบด (Fixed bed) การเผาเป็นแบบแบทช์ (Batch-type) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในอยู่ที่ 160 มิลลิเมตร ความสูงของห้องเผาไหม้อยู่ที่ 600 มิลลิเมตร วัสดุเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน (SS400) หุ้มด้วยเซรามิกไฟเบอร์เป็นฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแบบ เค (Thermocouple Type K) จำนวน 4 ตัวที่ระยะ (จากหน้าแผ่นเกรท) 150, 250, 350 และ 450 มิลลิเมตรตามลำดับ และถูกติดตั้งให้ปลายอยู่ในจุดกึ่งกลางของห้องเผาไหม้ซึ่งอยู่ห่างจากผนังของห้องเผาไหม้ 100 มิลลิเมตร บันทึกค่าโดยเครื่องมือประมวลผลการวัดอุณหภูมิ Data logger รุ่น Center 374 (ช่วงการวัดอุณหภูมิ -200˚C ถึง 1,350˚C, ความแม่นยำ ± 0.1% +0.7 ˚C) ระบบป้อนอากาศเข้าทางด้านล่างของห้องเผาไหม้โดยโบลเวอร์ (Blower) ควบคุมปริมาณอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยผู้ควบคุม ในห้องเผาไหม้มีตะแกรง (Grate) สำหรับแยกเถ้าและเชื้อเพลิง โดยเถ้าจากการเผาไหม้จะร่วงลงสู้ส่วนกักเก็บเถ้า และทำการเก็บแยกเถ้าด้วยมือหลังจากเสร็จสิ้นการทดลอง การเริ่มจุดเตาโดยการใช้หัวจุดแก๊สหุงต้ม (LPG) ทำการจุดจนเชื้อเพลิงเริ่มติดไฟแล้วจึงเริ่มทำการบันทึกข้อมูล

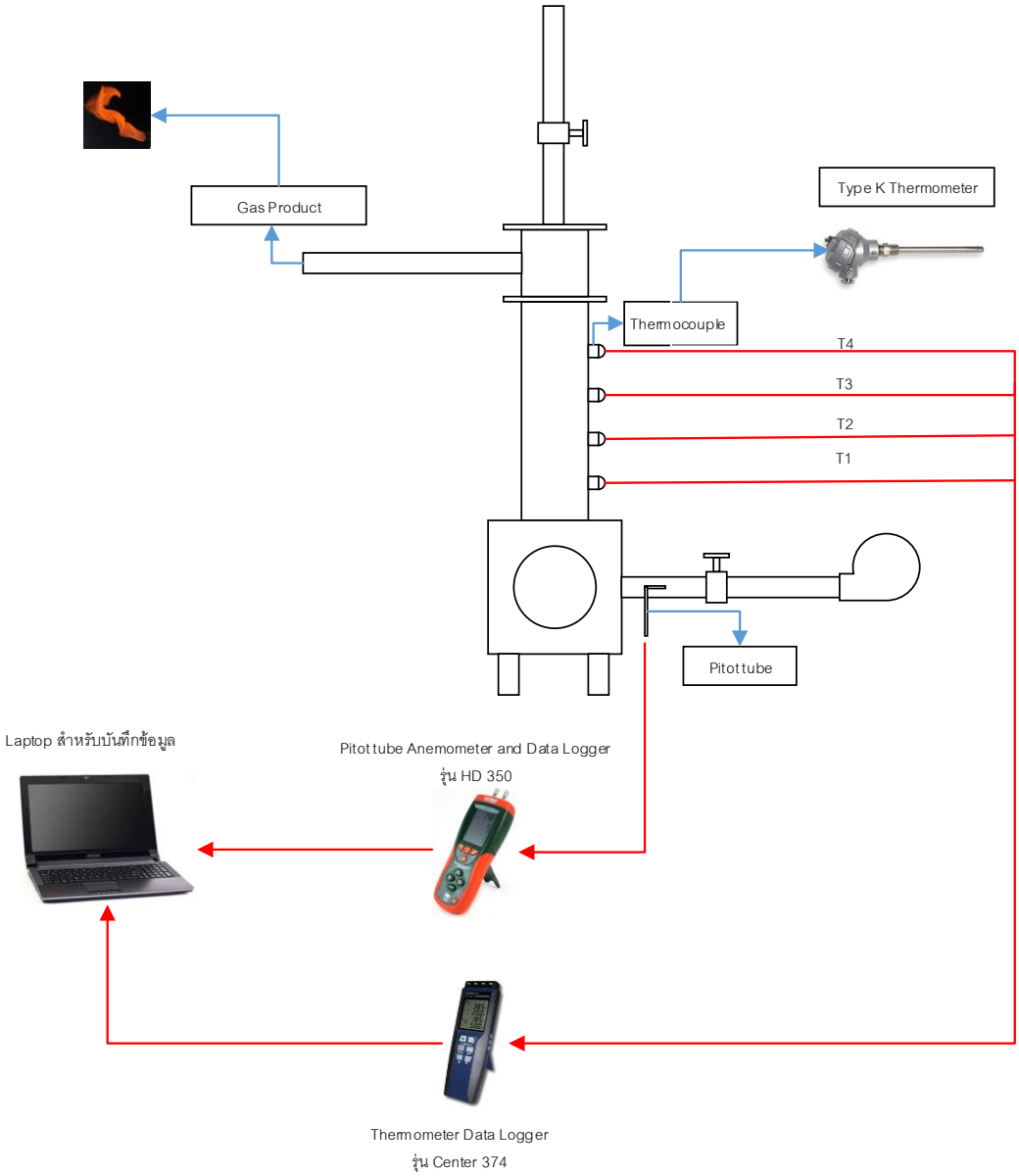


Figure 1 Schematic Diagram of Gasifier stove and equipment used in the experiment

Table 2 Summary of experimental condition

Condition	Description
Gasifier configuration	ID 160 mm batch-type updraft; L 600 mm
Temperature monitoring (mm. above the grate)	150, 250, 350, 450
Gasifying medium	Air
Gasifying medium flowrate in average (m^3/hr)	68
Gasifying medium velocity in average (m/s)	9.3
Individual fuels	Wood Charcoal; Wood Pellet
Fuel size (diameter, length; in mm)	Wood Charcoal (10, 40-70); Wood Pellet (15, 20-70)

Mixing fuels (WC:WP)	50:50
Start burning fuel	LPG
Combustion testing ignition fuel	LPG

ขั้นตอนการทดลอง

เป็นวิธีการทำลองโดยทำการแบ่งกลุ่มเชื้อเพลิงออกเป็นชนิด คือถ่านอัดแท่ง 100% ไม้อัดแท่ง 100% และเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านอัดแท่งและไม้อัดแท่งในอัตราส่วน 50: 50 โดยในแต่ละการทดลองจะทำการตั้งปริมาณเชื้อเพลิงในการเริ่มต้นไว้ที่ 5 กิโลกรัม ทำการทดสอบโดยใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาชีวมวลแบบไหลขึ้น หลังจากเริ่มต้นการจุดเตา สังเกตและพิจารณาความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละลำดับชั้น ดูลักษณะของการเกิดควัน การติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์ และลักษณะของเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ และบันทึกผลที่ได้เพื่อทำการเปรียบเทียบ



a) b) c)

Figure 2 Fuel batch in experiment a) Wood pellet, b) Charcoal, c) Mix fuel

การวัดอุณหภูมิเพื่อทำการเปรียบเทียบ ทำโดยการใช้เทอร์โมคัปเปิล ติดตั้งไปในส่วนของห้องเผาไหม้ โดยตรงปลายแท่งเทอร์โมคัปเปิลจะติดตั้งตรงกลางของห้องเผาไหม้ในแต่ละโซนและทำการเก็บค่าโดยใช้เครื่องมือวัดแบบพกพาแสดงค่าและบันทึกผลต่อเนื่องในส่วนของขั้นตอนการทดสอบการติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์จะเริ่มทำการจุดเมื่ออุณหภูมิในโซนเผาไหม้เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) จะทำการปิดโบลเวอร์ที่ใช้ป้อนอากาศและทำการทดสอบการติดไฟโดยการใช้หัวจุดแก๊สแอลพีจี จุดเพื่อสังเกตลักษณะเปลวไฟการเผาไหม้ ความสามารถในการจุดติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์ และทำการบันทึกค่าเปรียบเทียบระยะเวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงในแต่ละกลุ่มเชื้อเพลิง

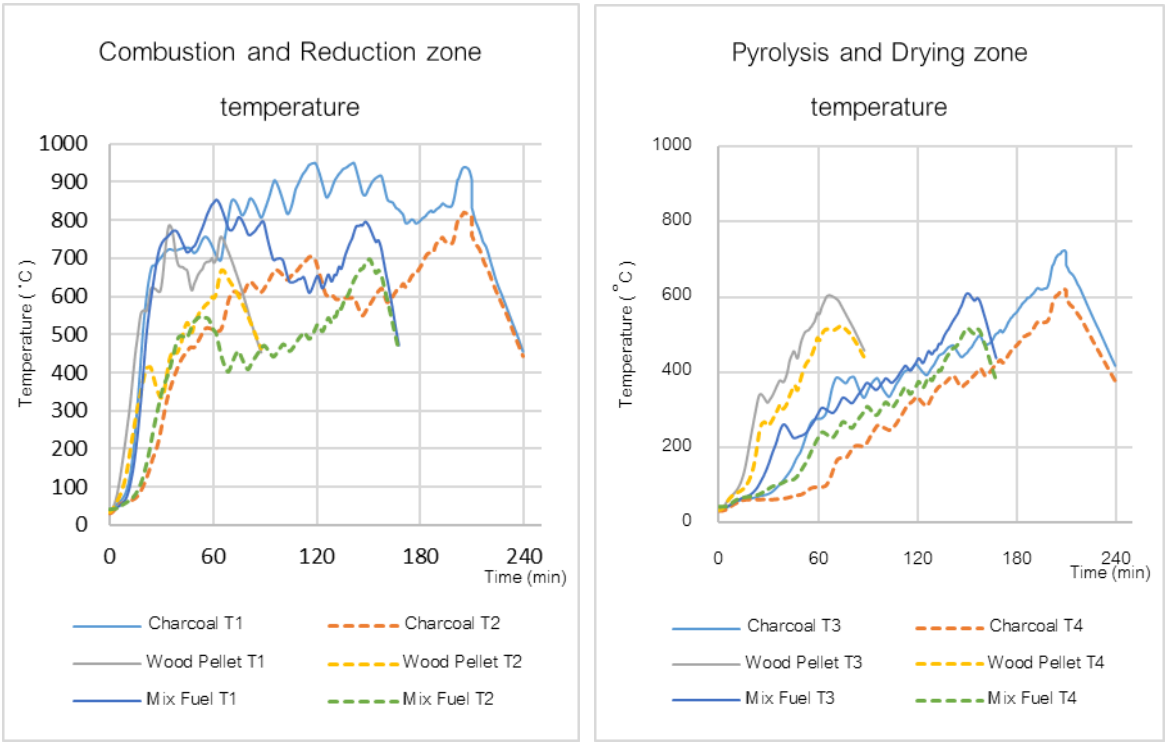
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

อุณหภูมิของเตาที่โซนเผาไหม้และโซนรีดักชั่นขณะทำการทดลองสำหรับตัวอย่างทั้งสามชนิด

จากการทดลองใช้เชื้อเพลิงทั้งสามกลุ่มแล้วพบว่า กลุ่มของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันส่งผลให้อุณหภูมิในแต่ละโซนของเตาชีวมวลชนิดไหลขึ้นมีความแตกต่างกันโดยในโซนเผาไหม้พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ดมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว สามารถทำอุณหภูมิได้สูงสุดในช่วงต้นของการเผาไหม้ และสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วที่สุดที่ระยะเวลาประมาณ 30 นาทีที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส ตามภาพ Figure 4 และแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในตอนนี้สามารถจุดติดไฟได้ ซึ่งถือเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ระยะเวลาที่สั้นที่สุดในการผลิตแก๊สที่จุดติดไฟได้นับจากเวลาเริ่มจุดเตา สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 787 องศาเซลเซียส ตามตาราง Table 3 และมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 551 องศาเซลเซียส ในขณะที่ถ่านอัดแท่ง มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 950 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 750 องศาเซลเซียสตามสาเหตุที่ถ่านอัดแท่งมีอุณหภูมิเผาไหม้สูงกว่าเนื่องมาจากค่าความร้อนสูงของถ่านอัดแท่งอยู่ที่ 23.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามตาราง Table 1 ซึ่งมากกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ดซึงอยู่ที่ 17.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัมซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ดสอดคล้องกับอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้ซึ่งอยู่ที่ 854 และ 647 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อทำการลดปริมาณออกซิเจนที่เข้าสู่โซนนี้โดยการปิดการป้อนอากาศเข้าไปจะส่งผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ในโซนนี้ ทำให้อุณหภูมิลดต่ำลงในช่วงที่ปิดการป้อนอากาศ สังเกตได้จากกราฟ Figure 3a จะมีช่วงการตกลงของอุณหภูมิอย่างชัดเจนซึ่งเป็นช่วงที่ทำการปิดการป้อนอากาศเข้าสู้ห้องเผาไหม้ ใกล้เคียงกับในส่วนของโซนรีดักชั่น ซึ่งเป็นโซนผลิตก๊าซ สังเคราะห์ ผลของปริมาณออกซิเจนที่เข้าสู่โซนนี้ เมื่อลดลง ถึงแม้จะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิในโซนนี้เช่นเดียวกับโซนเผาไหม้ แต่ก็ยังไม่เด่นชัดเหมือนกับอุณหภูมิในโซนเผาไหม้ อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยจะน้อยกว่าในโซนเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นชีวมวลไม้อัดเม็ดอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ 669 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิเฉลี่ยจะอยู่ที่ 328 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านอัดแท่ง ที่มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 820 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิเฉลี่ยจะอยู่ที่ 546 องศาเซลเซียส และสังเกตการทดลองที่ใช้เชื้อเพลิงที่ผสมระหว่างชีวมวลไม้อัดเม็ดและถ่านอัดแท่งพบว่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้ ใกล้เคียงกับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ด โดยอยู่ที่ 698 และ 393 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Table 3 Comparison for Temperature of Charcoal, Pellet and Mix fuel

Item	Temperature at each zone (˚C)							
	Combustion		Reduction		Pyrolysis		Drying	
	Max.	Avg.	Max.	Avg.	Max.	Avg.	Max.	Avg.
Wood pellet	787	551	669	328	603	327	514	254
Mix fuel	854	647	698	393	609	329	516	264
Charcoal	950	750	820	546	724	384	620	294



a) b)

Figure 3 Temperature distribution at pyrolysis zone and drying zone a) Combustion and Reduction zone, b) Pyrolysis and Drying zone

อุณหภูมิของเตาที่โซนไพโรไลซิสและโซนอบแห้งขณะทำการทดลองสำหรับตัวอย่างทั้งสามชนิด

ในโซนไพโรไลซิสและโซนอบแห้งจะเป็นโซนที่การควบคุมปริมาณออกซิเจนที่เข้าสู่เตาผลิตแก๊สชีวมวลไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิในทั้งสองโซนนี้มากนักทำให้อุณหภูมิในทั้งสองโซนนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการแบ่งแยกระดับชั้นของกราฟแสดงอุณหภูมิอย่างชัดเจนดังแสดงใน Figure 3b โดยอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดในชั้นไพโรไลซิสของชีวมวลไม้อัดเม็ดอยู่ที่ 327 และ 603 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากตาราง Table 3 ซึ่งยังคงเป็นค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านอัดแท่งซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดในชั้นไพโลไลซิส อยู่ที่ 384 และ 724 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อทำการผสมเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของเชื้อเพลิงแบบผสมนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของชีวมวลไม้อัดเม็ด แต่มีค่าสูงกว่าโดยอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุด อยู่ที่ 329 และ 609 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สอดคล้องกับอุณหภูมิในโซนอบแห้งที่อุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดของเชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ดยังคงต่ำที่สุด อยู่ที่ 254 และ 514 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงแบบผสมที่อุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 264 และ 516 องศาเซลเซียสตามดับ ในส่วนของถ่านอัดแท่งยังมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 294 และอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 620 องศาเซลเซียส

ซึ่งจากกราฟแสดงอุณหภูมิ Figure 3 จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิในทั้งสองโซนนี้จะมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ในช่วงท้ายของการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณออกซิเจนที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ ไม่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในทั้งสองโซนนี้

ระยะเวลาในการเผาไหม้และความสามารถในการจุดติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์

ผลที่เกิดขึ้นพบว่าระยะเวลาในการเผาไหม้โดยใช้เตาชีวมวลของเชื้อเพลิงตัวอย่างทั้งสามชนิดนับตั้งแต่เริ่มจุดเตาจนกระทั่งสิ้นสุดในจุดที่แก๊สผลิตภัณฑ์ไม่สามารถจุดติดไฟได้และอุณหภูมิเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง พบว่าเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านอัดแท่งจะมีระยะเวลานานที่สุด ในขณะที่เชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ดจะมีระยะเวลาสั้นที่สุด และผลจากการผสมเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันจะทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ยาวนานขึ้นกว่าใช้เชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ดเพียงอย่างเดียวถึง 2.5 เท่า และในส่วนของความสามารถในการจุดติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์ ถ่านอัดแท่งจะมีระยะเวลาในการจุดติดไฟรวมยาวนานที่สุดสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ด 5 เท่า และเมื่อทำการใช้เชื้อเพลิงที่ผสมระหว่างชีวมวลไม้อัดเม็ดและถ่านอัดแท่งเข้าด้วยกันจะทำให้ความสามารถในการจุดติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นกว่าใช้เชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ดเพียงอย่างเดียวถึง 4 เท่าซึ่งถือว่าทำได้ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านอัดแท่ง ดังแสดงในตาราง Table 4

Table 4 Comparison for Flammable and Burning time of Charcoal, Pellet and Mix fuel

	Charcoal	Wood Pellet	Mix fuel
Burning time (hrs.)	3:29	1:05	2:37
Ignitable time (times)	9	3	10
Total Ignitable duration(sec) min	42:16	9:04	35:10

ลักษณะการเผาไหม้และเปลวไฟ

ลักษณะของเปลวไฟของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่เป็นชีวมวลไม้อัดเม็ด การเผาไหม้จะเห็นลักษณะของสารระเหยผสมอยู่ในเปลวไฟ และยังมีควันที่เหลือจากการเผาไหม้ของไฟที่จุดทดสอบให้เห็นอยู่อย่างชัดเจนตามภาพ Figure 4a เป็นผลมาจากองค์ประกอบของตัวเชื้อเพลิงที่มีสารระเหย (volatile matter) อยู่ถึง 76.8 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตาราง Table 1 ทำให้เมื่อทำการเผาไหม้จะมีสารระเหยออกมามากและทำให้เผาไหม้ได้ไม่หมด สารระเหยที่เผาไหม้ไม่หมดนี้จึงออกมาพร้อมกันกับแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งการเผาไหม้ของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างจากเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านอัดแท่งเพียงอย่างเดียว โดยแก๊สที่ได้สามารถจุดติดไฟได้ดี และมองเห็นสารระเหยได้น้อยตามภาพ Figure 4b สอดคล้องกับข้อมูลตามตาราง Table 1 ซึ่งพบสารระเหยอยู่ 29.2 เปอร์เซ็นต์ในถ่านอัดแท่ง และเมื่อทำการผสมเชื้อเพลิงทั้งสองเข้าด้วยกัน ปริมาณสารระเหยจะอยู่ที่ 53 เปอร์เซ็นต์ตามการคำนวณ หลังจากทำการทดลองจุดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชีวมวลพบว่าถึงแม้การเผาไหม้จะค่อนข้างดีใกล้เคียงกับการใช้ถ่านอัดแท่ง แต่ยังสังเกตเห็นสารระเหยอยู่ในเปลวไฟอยู่เล็กน้อย ตาม Figure 4c



a) b) c)

Figure 4 Flame appearance a) Wood pellet batch b) Charcoal batch c) Mix fuel batch

ลักษณะของเถ้าและเศษเหลือจากการเผาไหม้

เถ้าที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นชีวมวลไม้อัดเม็ด 100% จะมีลักษณะเป็นผงค่อนข้างละเอียด ลักษณะตามรูป Figure 5a ตกอยู่ในส่วนกักเถ้าของเตา มีติดอยู่ตรงตะแกรงบ้างเล็กน้อย ซึ่งแตกต่างจากเถ้าที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นถ่านอัดแท่ง 100% ที่จะสองมีแบบคือ เป็นก้อนแข็งมีรูพรุนเกาะติดกับแผ่นตะแกรงเปราะ แตกหักง่าย และเป็นผงเถ้าปนกับก้อนแข็งเล็กๆลักษณะตามรูป Figure 5b, 5c และในส่วนของเถ้าที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นแบบผสม จะสองมีลักษณะคือลักษณะเป็นก้อนแข็งมีรูพรุนเกาะติดกับแผ่นตะแกรงเปราะ แตกหักง่าย และลักษณะเป็นผงเถ้าปนกับก้อนแข็งเล็ก ๆลักษณะใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงที่เป็นถ่านอัดแท่ง แต่ในเชื้อเพลิงแบบผสมเถ้าที่เป็นก้อนจะมีปริมาณน้อยกว่า และเถ้าที่เป็นผงจะมีปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับเมื่อใช้เชื้อเพลิงเป็นถ่านอัดแท่ง แสดงตามภาพ Figure 5d, 5e



a) b) c) d) e)

Figure 5 Ash from experiment a) Wood pellet, b) Charcoal : agglomerate, c) Charcoal : powder, d) Mix fuel : agglomerate, e) Mix fuel : powder

สรุป

จากการทดลองศึกษาการผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้เชื้อเพลิงตัวอย่างสามชนิด คือ ชีวมวลไม้อัดเม็ด ถ่านอัดแท่ง และเชื้อเพลิงแบบผสมระหว่างชีวมวลไม้อัดเม็ดและถ่านอัดแท่ง ในเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลขึ้น ชนิดฟิกซ์เบด พบว่าชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้จะส่งผลต่ออุณภูมิในเตาผลิตแก๊สชีวมวล ระยะเวลาการเผาไหม้ชีวมวลและประสิทธิภาพในการจุดติดไฟของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ ชีวมวลไม้อัดเม็ดจะให้อุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุด แต่มีการเผาไหม้ได้เร็ว ลักษณะของการจุดแก๊สผลิตภัณฑ์จะเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ถ่านอัดแท่งจะให้อุณภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดแต่เผาไหม้ได้ช้ากว่า แต่ลักษณะของไฟจากแก๊สผลิตภัณฑ์จะเผาไหม้ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับชีวมวลไม้อัดเม็ด เนื่องจากถ่านอัดแท่งมีค่าความร้อนที่สูงกว่าแต่อย่างไรก็ตามชีวมวลไม้อัดเม็ดมีปริมาณสารระเหยที่สูงกว่าทำให้ในการผสมชีวมวลไม้อัดเม็ดเข้ากับถ่านอัดแท่งทำให้เชื้อเพลิงแบบผสมที่ได้ เมื่อนำไปทำการทดลองใช้ในเตาชีวมวล พบว่ามีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นกว่าการใช้ชีวมวลไม้อัดเม็ดเพียงอย่างเดียวและสามารถเผาไหม้ได้เร็วขึ้น และใช้เวลาในการที่อุณหภูมิจะเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าการใช้ถ่านอัดแท่งเพียงอย่าง มีระยะเวลาในการจุดติดไฟโดยรวมเพิ่มขึ้นถึง 4 เท่า และจำนวนครั้งในการจุดติดไฟเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า และสามารถเผาไหม้ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ชีวมวลไม้อัดเม็ดเพียงอย่างเดียว จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลไม้อัดเม็ดร่วมกับถ่านอัดแท่งน่าจะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาผลิตแก๊สชีวมวล

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทำการทดลองและอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่สนับสนุนเตาเผาชีวมวลสำหรับการทดลอง ขอบพระคุณครอบครัวที่สนับสนุนในด้านงบประมาณ การจัดหาเชื้อเพลิง และกำลังใจที่ดีอย่างยิ่ง รวมถึงขอบพระคุณเพื่อนๆที่คอยช่วยเหลือทั้งเวลาและแรงกายมาช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

วิชัย ศิวะโกศิษฐ. 2010. **การออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลงเพื่อใช้ในการอบแห้งในโรงงานผสมปุ๋ยขนาดเล็กโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวน**. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48

นิติรงค์ พงษ์พานิช. 2555. **การพัฒนาประสิทธิภาพของเตาชีวมวลโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9

ภานุพงษ์ หมั่นขีด. 2555. **การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีวมวลชนิดไหลลง**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน. 2558. **สถานการณ์พลังงานไทย ปี 2557**. กระทรวงพลังงาน

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2555. **สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2555**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

อุปสรรคในการดูแลรักษาอาคารในมุมมองของผู้ดูแลอาคาร: กรณีศึกษาอาคารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Barrier to Building Maintenance in Facilitator Vision: A Case Study of Kasetsart University

ฐิติพงศ์ สุขเสริม[1*] และ ปิยนุช เวทย์วิวรณ์[1]

Thitipong Sookserm[1*], and Piyanut Wethyavivorn[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุปสรรคในการดูแลรักษาอาคาร เพื่อเสนอแนวทางการแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลรักษาอาคาร แบบสอบถามจำนวน 70 ชุด (อาคาร) ได้ถูกส่งไปยังผู้ดูแลอาคารของแต่ละอาคารภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อประเมินอุปสรรคและขั้นตอนในการดูแลรักษาอาคาร จากการวิเคราะห์แบบสอบถามทั้ง 47 ชุดที่ได้รับกลับคืนมาด้วยวิธีการวิเคราะห์ปัจจัย สามารถจำแนกอุปสรรคได้ 4 ด้าน 20 ปัจจัย ส่วนขั้นตอนจำแนกได้ 5 ด้าน 23 ปัจจัย จากนั้นใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยหลายตัวแปรเพื่อหาความสัมพันธ์ของอุปสรรคและขั้นตอนการดูแลรักษาอาคารใน 3 รายการที่เป็นปัญหา จากผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณร่วมกับการสัมภาษณ์ผู้ดูแลอาคาร พบว่าอุปสรรคด้านองค์กรและการออกแบบส่งผลโดยขั้นตอนการดูแลรักษาอาคาร ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทัศนคติที่ดีต่อการดูแลรักษาอาคาร องค์กรต้องตระหนักถึงอุปสรรคและใส่ใจในการดูแลรักษาอาคาร พร้อมทั้งจัดสรรงบประมาณในส่วนนี้โดยเฉพาะ และพัฒนาองค์ความรู้และศักยภาพของผู้ที่ส่วนเกี่ยวข้องทุกฝ่าย ซึ่งจะนำไปสู่ทัศนคติที่ดีต่อการมีส่วนร่วมดูแลรักษาอาคารของผู้ใช้อาคาร

ABSTRACT

This study aims to investigate Barrier to Building Maintenance in Facilitator Vision in order to improve Building Practices Performance. Data is collected through questionnaire survey and structure interview. Questionnaires assessing the level of barrier severe and frequency of practice were sent to 70 Building in Kasetsart University, out of which 47 sets were returned. Using the factor analysis technique, 20 barriers and 23 practices were revealed and further classified into 4 and 5 categories in order. Multiple Regression analysis was used to explain how each barrier affects each practice. The results indicate that there are two factors directly affecting of building maintenance practices including organization and design barriers. However, basis of organization and design barriers are positive attitude in building maintenance of management. They must allocate budget for building maintenance specially. They must sincerely aware building maintenance and develop knowledge and capability of their staff continuously to raising positive attitude of stakeholder in the building.

Key Words: Building Maintenance, Barrier, Facility Management

* Corresponding author; e-mail address: what_zup25@hotmail.com

[1]ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ข้อมูลสถิติของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน พบว่านับตั้งแต่ปี 2552 จนถึงปี 2556 ระบุว่ามีพื้นที่ก่อสร้างเพิ่มขึ้นทุกปีประมาณ 19,112 ตารางเมตรโดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10.51 ในแต่ละปี แต่หากพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรนิสิต (จำนวนนิสิตจบการศึกษาหักลบกับจำนวนนิสิตใหม่ในปีเดียวกัน) กลับพบว่ามีอัตราที่ลดลงเฉลี่ยถึงร้อยละ 6 ในแต่ละปี แสดงให้เห็นถึงการสร้างพื้นที่การใช้งานที่เพิ่มขึ้นแต่อัตราการเปลี่ยนแปลงของประชากรนิสิตในแต่ละกลับลดลง และก่อเกิดให้เกิดปัญหาเช่นเดียวกันได้แก่การใช้งบประมาณที่เพิ่มสูงขึ้นโดยในปี 2555 มีการใช้งบประมาณสำหรับสิ่งปลูกสร้างถึง 1,092 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 15.6 ของงบประมาณรายจ่ายทั้งหมด การลดพื้นที่สีเขียว โดยช่วงปี 2556 ถึง 2557 มหาวิทยาลัยมีพื้นที่ป่าลดลงถึงร้อยละ 9 และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น จากข้อมูลปี 2555 พบว่าค่าใช้จ่ายด้านสาธารณูปโภคสูงถึง 345.3 ล้านบาท โดยคิดเป็นร้อยละ 3.7 ของงบประมาณรายจ่ายทั้งหมด

ในการสร้างอาคารใหม่ในประเทศไทยนั้น พบว่าหลายครั้งมีการทุบทำลายอาคารเดิม โดยไม่ได้ดูแลรักษาหรือปรับให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การใช้งานที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ข้อมูลจากวารสารเมืองโบราณ (2556) อาคารศาลฎีกาถูกทุบทำลายเพื่อสร้างขึ้นใหม่โดยไม่มีการพิสูจน์ว่าอาคารนั้นได้เสื่อมโทรมจนไม่สามารถใช้งานได้หรือไม่ ที่มาของการรื้อถอนอาคารดังกล่าวอาจการจะเกิดจากขาดการดูแลรักษาอย่างต่อเนื่องทำให้อาคารเกิดความเสียหายสะสมเรื่อยมาจนกระทั่งไม่สามารถดูแลรักษาได้อีก ความไม่ใส่ใจของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่มีหน้าที่รับผิดชอบ หรือขาดการจัดสรรงบประมาณและบุคลากรที่จำเป็น การศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุปสรรคในการดูแลรักษาอาคารในมุมมองของผู้ดูแลอาคารที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการดูแลอาคารมากที่สุดผ่านกรณีศึกษาอาคารที่มีกิจกรรมการเรียนการสอนและอาคารที่สำคัญ ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่มีความพร้อมด้านบุคลากร ความรู้ และเครื่องมือสำหรับดูแลรักษาอาคาร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาในการดูแลรักษาอาคาร

ภาพรวมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาในการดูแลรักษาอาคาร ชี้ให้เห็นปัญหาที่คล้ายคลึงกัน ได้แก่ Moseki *et al*. (2011), Dahle and Neumayer (2001), Richardson and Lynes (2007) ระบุถึงอุปสรรคการขาดการจัดสรรงบประมาณและทรัพยากรที่จำเป็นและเหมาะสมสำหรับการดูแลรักษาอาคาร การขาดจิตสำนึกของผู้ใช้อาคารในการช่วยดูแลรักษาอาคารโดยให้เหตุผลว่าไม่มีเวลาเพียงพอจากการทำงานและกิจกรรมอื่นๆ ผู้ใช้อาคารเองไม่ทราบว่าต้องปฏิบัติตัวอย่างไรจึงจะมีส่วนช่วยในการดูแลรักษาอาคารหรือไม่มีผลตอบแทนที่จูงใจให้ผู้ใช้อาคารมีส่วนร่วมในการดูแลรักษาอาคาร Williams and Dair (2007) กล่าวว่าผู้ที่มีหน้าที่ดูแลรักษาอาคารยังขาดความองค์ความรู้ที่ถูกต้องและเป็นมาตรฐานในการปฏิบัติงานดูแลรักษาอาคาร Al-Hammad*et al*. (1997) ยังกล่าวด้วยว่าปัญหาที่เกี่ยวข้องกับอาคารโดยตรงที่พบคือ การออกแบบงานระบบของอาคารโดยไม่คำนึงการเข้าไปบำรุงรักษาในภายหลัง หรือการเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์โดยไม่คำนึงถึงสภาพแวดล้อมโดยรอบอาคาร

ขั้นตอนการปฏิบัติงานในการดูแลรักษาอาคาร

เอกสารสัญญาจัดซื้อจัดจ้างของหน่วยงานราชการได้แก่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และกระทรวงพาณิชย์ จากหน่วยงานจากต่างประเทศได้แก่ The Urban

Homesteading Assistance Board and HPD Department of Housing Preservation and Development of the City of New York แบ่งการปฏิบัติงานออกเป็น 2 ลักษณะคือการดูแลรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) เช่น การตรวจสอบการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าตามระยะเวลาที่กำหนด และการดูแลรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง (General Maintenance) เช่น การดูรักษาความสะอาดอาคารโดยทั่วไป

อุปกรณ์และวิธีการ

จากรายการของอุปสรรคในการดูแลรักษาอาคาร 26 รายการและขั้นตอนการดูแลรักษาอาคาร 24 รายการที่รวบรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมา อุปสรรคที่เกี่ยวข้องกับการดูแลรักษาอาคารแบ่งเป็น 4 ด้าน คือ องค์กร วัฒนธรรม งบประมาณ และการออกแบบ ขั้นตอนการดูแลรักษาอาคารแบ่งเป็น 2 ด้าน คือ การดูแลรักษาเชิงป้องกัน และการดูแลรักษาเชิงแก้ไขปรับปรุง นำไปสร้างเป็นแบบสอบถามในการสำรวจข้อมูลกับอาคารในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ต่อไป

ผู้วิจัยส่งแบบสอบถามไปยังผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ด้านการตรวจสอบและดูแลอาคารมากกว่า 20 ปี ประกอบด้วยนักวิชาการจาก สถานศึกษา ผู้บริหารระดับสูง จากองค์กรเอกชน และผู้เชี่ยวชาญด้านการตรวจสอบและดูแลจำนวน 10 ท่าน (Figure 1) เพื่อประเมินความถูกต้องด้านเนื้อหาของแบบสอบถาม ผู้เชี่ยวชาญตัดรายการคำถามหัวข้ออุปสรรคในการดูแลรักษาอาคารจาก 26 รายการเหลือ 20 รายการ และขั้นตอนในการดูแลรักษาอาคารจาก 24 รายการเหลือ 23 รายการ

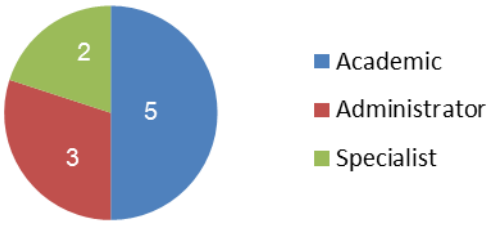


Figure 1 Experts building maintenance and facilities management who reviewed the questionaire

ในช่วงเดือนมิถุนายน 2557 แบบสอบถามจำนวน 70 ชุด (อาคาร) ได้ถูกส่งไปยังผู้ดูแลอาคารของแต่ละอาคารภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่มีการเรียนการสอนเป็นประจำ ทั้ง 16 คณะ รวมถึงอาคารที่มีมาตรฐานการดูแลรักษาในระดับที่ดีมาก ซึ่งระบุโดยงานวิจัยของ อัญชลี (2556) หลังจากติดตามข้อมูลตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2557 ถึง สิงหาคม 2557 ได้รับแบบสอบถามกลับมาทั้งสิ้น 47 ชุด (อาคาร) (Figure 2) โดยผู้ตอบแบบสอบถามเป็นผู้ที่มีหน้าที่หรือเกี่ยวข้องโดยตรงกับการดูแลรักษาอาคารแต่ละอาคาร ร่วมกับการสัมภาษณ์ผู้ดูแลอาคารที่ให้ความอนุเคราะห์ 10 ท่าน

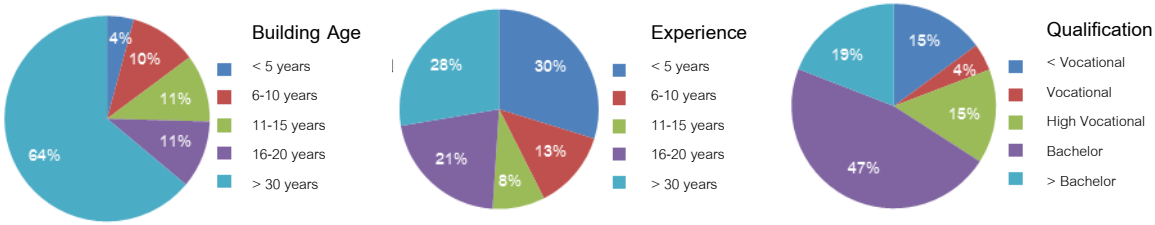


Figure 2 Questionnaire distribution

เกณฑ์การให้คะแนนแบบสอบถาม

ส่วนที่ 1 สอบถามระดับความรุนแรงของอุปสรรคที่มีผลต่อการดูแลรักษาอาคาร 4 ด้าน คือ ด้านงบประมาณ ด้านวัฒนธรรม ด้านการออกแบบ และด้านองค์กร มีเกณฑ์การให้คะแนนได้แก่ ระดับ 5 คือ ไม่เป็นอุปสรรคเลย ระดับ 4 คือ เป็นอุปสรรคน้อย ระดับ 3 คือ เป็นอุปสรรคปานกลาง ระดับ 2 คือ เป็นอุปสรรคมาก ระดับ 1 คือ เป็นอุปสรรคมากที่สุด

ส่วนที่ 2 สอบถามความถี่ในขั้นตอนการดูแลรักษาอาคารเทียบกับมาตรฐานที่กำหนดให้ 2 ด้าน คือ ด้านดูแลรักษาอาคารเชิงป้องกัน และการดุแลรักษาอาคารเชิงแก้ไขปรับปรุง มีเกณฑ์การให้คะแนนได้แก่ ระดับ 5 คือ ดำเนินการมากที่สุด ระดับ 4 คือ ดำเนินการมาก ระดับ 3 คือ ดำเนินการปานกลาง ระดับ 2 คือ ดำเนินการน้อย ระดับ 1 คือ ดำเนินการน้อยที่สุด

ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามใช้โปรแกรม SPSS โดยแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกเป็นการระบุอุปสรรคและขั้นตอนในการดูแลรักษาอาคารโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) ในการจัดกลุ่มอุปสรรคในการดูแลรักษาอาคารทั้ง 20 รายการ ให้เป็นกลุ่มย่อยที่มีความเกี่ยวข้องกันทางสถิติ จากการวิเคราะห์สามารถระบุได้ 4 รายการ พร้อมทั้งค่าเฉลี่ยของผลกระทบของอุปสรรคที่มีต่อการปฏิบัติงาน (Table 1)

จากค่าเฉลี่ยที่แสดงใน Table 1 ผู้ดูแลอาคารเห็นว่าอุปสรรคที่เกิดจากวัฒนธรรมของผู้ใช้อาคารส่งผลต่อการปฏิบัติงานมากที่สุด ในเรื่องผู้ใช้อาคารขาดจิตสำนึกด้านการอนุรักษ์พลังงาน ผู้ใช้อาคารขาดการใส่ใจที่จะช่วยดูแลรักษาอาคาร ผู้ใช้อาคารขาดส่วนร่วมในการวางแผนการดูแลรักษาอาคาร และผู้ใช้อาคารขาดความรู้และขั้นตอนในการดูแลรักษาอาคาร ในขณะที่เห็นว่าอุปสรรคด้านการออกแบบส่งผลต่อการปฏิบัติงานเป็นลำดับสุดท้าย

Table 1 Barriers to building maintenance

Barriers	Mean	Rank
Culture	2.89	1
Lack of energy conservation awareness	2.83	1
Lack of attention to help maintain the building	2.87	2
Lack of participation to building maintenance planning	2.94	4
Lack of building maintenance knowledge	2.94	5
Organization	3.24	2
No activity to encourage building maintenance	2.87	3
Lack of relevant training on building maintenance	3.06	6
Lack of channels to track and comment	3.06	7
Lack of the building maintenance result record after operation	3.09	8
Facilitator unawareness to operation following standard and principle	3.28	11
Lack of information for establish a budget	3.32	12
Top manager not seriously support building maintenance	3.51	16
Lack of approved the disbursement budget	3.70	18
Finance	3.28	3
Lack of spare parts for building budget planned	3.10	9
Lack of importance record (i.e. As-built drawings, Building records etc.)	3.40	15
Lack of building maintenance budget directly	3.32	13
Design	3.49	4
Incoordinate among each designing	3.17	10
Ignoring aggressive environmental effects	3.38	14
Designing not satisfied with user's intended	3.66	17
Ignoring maintenance requirements in the design	3.75	19

เช่นเดียวกัน ในการจัดกลุ่มขั้นตอนการดูแลรักษาอาคารทั้ง 23 รายการ ให้เป็นกลุ่มย่อยที่มีความเกี่ยวข้องกันทางสถิติ จากการวิเคราะห์สามารถระบุได้ 5 รายการ พร้อมทั้งค่าเฉลี่ยของความถี่ในขั้นตอนการดูแลรักษาอาคารเทียบกับมาตรฐานที่กำหนดให้ดังแสดงใน (Table 2)

จากค่าเฉลี่ยที่แสดงใน Table 2 แสดงให้เห็นว่าผู้ดูแลอาคารดูแลรักษาสภาพภายนอกอาคารน้อยที่สุด ประกอบด้วย การตรวจสอบและซ่อมแซมงานทาสีเบื้องต้น การตรวจสอบรอยแตกร้าวของผนัง การตรวจสอบและซ่อมแซมงานไม้เบื้องต้น และตรวจสอบความเรียบร้อยของสายไฟและท่อร้อยสายไฟ ในขณะที่การดูแลรักษาอาคารประจำวันได้รับการปฏิบัติมากที่สุด แต่หากพิจารณาลำดับค่าเฉลี่ยรวมแล้วจะพบว่าการปฏิบัติงานที่ได้รับการปฏิบัติน้อยที่สุดเป็นขั้นตอนที่จำเป็นต้องมีผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางหรือมีทักษะเฉพาะเพื่อมาปฏิบัติงาน เช่นงานทาสี งานเช็ดกระจกภายนอกอาคาร การดูแลรักษาเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

Table 2 Maintenance practices

Maintenance practices	Mean	Rank
Exterior building maintenance	3.32	1
Inspect building paintings	3.15	1
Restore cracks and blemishes on building exterior	3.32	5
Keep all wooden parts freshly	3.32	6
Make sure that cables and conduits are firmly attached to walls or beams, and that nothing is hanging from them	3.51	12
High location maintenance	3.45	2
Clean exterior building glass	3.19	2
Regular AC maintenance (Clean filters, Check fan belt tension and hose connections for leaks and cracks)	3.32	4
Clean Interior building glass and pest control	3.45	9
HVAC services (Duct repair and replacement, Thermostat installation and repair, Indoor air-quality solutions)	3.45	7
Clean high location (i.e. cobweb sweep, bulb wipe etc.)	3.85	17
Building components maintenance	3.67	3
Lubricate all hinge and lock mechanisms frequently, especially in wet or cold weather	3.21	3
Check latches and locks of all windows and doors, and repair and replace immediately	3.45	8
Check condition and safety (i.e. wire, duct etc.)	3.47	10
If your building has fuses rather than circuit breakers, replace fuses a needed and keep a good supply available	3.51	11
Clean drains and keep them clear	3.60	14
Inspect wiring periodically and eliminate any fire hazards	3.70	15
Repair leaky faucets as they're reported	3.89	19
Check operation of appliances and lighting	3.91	20
Air conditioner tune up (Inspect coolant levels and pressure, tighten wiring, contacts, capacitors and relays)	4.26	21
Other building maintenance	3.70	4
Clean roof and terrace	3.53	13
Ensure that lights and air conditioner are turned on and off at proper times	3.72	16
Check for plumbing leaks	3.85	18
General Building maintenance	4.47	5
Garbage collection	4.38	22
Regular cleaning (Clean the sidewalks, Mop the entrance and vestibule daily.)	4.55	23

ขั้นตอนที่สองจะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างอุปสรรคและขั้นตอนในการดูแลรักษาอาคารในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยการหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlations) และวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นตรงแบบหลายตัวแปร (Multiple Linear Regression Analysis) (Table 3, 4)

Table 3 Correlations Analysis

	Organization	Cultural	Design	Finance
Organization	1			
Cultural	.341*	1		
Design	.387**	.363*	1	
Finance	.530**	.205	.376**	1

** significant = 0.01

Table 4 Multiple Linear Regression Analysis

	Beta	Adj.R^2	F
Exterior building maintenance		0.332	12.431
Organization	0.305		
Design	0.413		
High location maintenance		0.265	17.558
Organization	0.530		
Building components maintenance		0.377	14.915
Organization	0.364		
Design	0.399		

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และความถดถอยเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่าอุปสรรคด้านงบประมาณมีความสัมพันธ์กับอุปสรรคด้านองค์กรและการออกแบบอย่างมีนัยสำคัญ และอุปสรรคทั้งสองด้านดังกล่าวเป็นอุปสรรคที่ส่งผลกระทบต่อขั้นตอนการดูแลรักษาอาคารที่เป็นปัญหาทั้ง 3 รายการ ได้แก่ การดูแลรักษาสภาพภายนอกอาคาร การดูแลรักษาอาคารบริเวณที่สูง และการดูแลรักษาอุปกรณ์ประกอบอาคาร แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าอุปสรรคด้านวัฒนธรรมที่ส่งผลต่อการปฏิบัติงานมากที่สุดจากการวิเคราะห์ปัจจัยในขั้นตอนแรกกลับพบว่าไม่ส่งผลโดยตรงกับขั้นตอนการปฏิบัติงานที่เป็นปัญหาทั้ง 3 รายการดังกล่าว

ผลการสัมภาษณ์ผู้ดูแลอาคาร ส่วนใหญ่มีความเห็นว่าอุปสรรคในการดูแลรักษาอาคารเกิดจากการที่ผู้ใช้อาคารคิดว่าหน้าที่ในการดูแลรักษาอาคารเป็นของผู้ดูแลอาคารเท่านั้น ขาดจิตสำนึกในการเป็นเจ้าของอาคาร จึงไม่ได้ให้ความสำคัญในการดูแลรักษาอาคาร เช่น ผู้ดูแลอาคารรายหนึ่งกล่าวว่า “นักศึกษาหลังเรียนเสร็จในแต่ละรายวิชา ไม่ได้สนใจช่วยปิดเครื่องปรับอาคาร ปิดไฟ ปิดโปรเจคเตอร์ หรือแม้แต่อุปกรณ์ในห้องน้ำที่พังชำรุดก็ไม่เคยได้รับการแจ้งซ่อมจากนักศึกษาเลย เพราะพวกเขาคิดว่าไม่ใช่หน้าที่ที่พวกเขาต้องรับผิดชอบ อย่างมากใช้อาคารไม่เกิน 4 ปี ก็จบการศึกษาออกไป” ในส่วนขั้นตอนการดูแลรักษาอาคาร ให้ความเห็นว่า “เจ้าหน้าที่หรือผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการดูแลรักษาปฏิบัติงานตามที่เคยปฏิบัติต่อๆกันมา” และสิ่งที่ต้องการได้รับการสนับสนุนจากฝ่ายบริหาร ให้ความเห็นว่า “อยากได้รับการอบรมขั้นตอนการดูแลรักษาอาคารอย่างถูกต้องหรือรับเจ้าหน้าที่ที่มีความรู้ในการดูแลรักษาอาคารโดยตรงมาช่วยทำงานเพราะปัจจุบันตนเองไม่ได้มีความรู้ในการดูแลรักษาอาคารโดยตรงเพียงแต่ได้รับมอบหมายหน้าที่มา”

สรุป

อุปสรรคที่ส่งผลกระทบขั้นตอนการดูแลรักษาอาคาร

จากการวิเคราะห์ผลการศึกษาจากแบบสอบถาม ตลอดจนการสัมภาษณ์ผู้ดูแลอาคารในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สามารถสรุปผลกระทบของขั้นตอนการดูแลรักษาอาคารที่มีสาเหตุจากอุปสรรคในการดูแลรักษาอาคารทั้ง 4 รายการ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาแนวทางการดูแลรักษาอาคารของอาคารอื่นๆต่อไป

อุปสรรคด้านองค์กร

อุปสรรคด้านองค์กรส่งผลต่อการซ่อมแซมสภาพภายนอกอาคาร (β=0.305) การดูแลรักษาอาคารและทำความสะอาดบริเวณที่สูง (β=0.530) และการซ่อมแซมอุปกรณ์และชิ้นส่วนประกอบอาคาร (β=0.364) องค์กรมีผลกระทบอย่างมากต่อขั้นตอนการปฏิบัติงานเนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สุดต่อการกำหนดทิศทางของการดูแลรักษาอาคาร Dahle and Neumayer (2001) พบว่าฝ่ายบริหารที่ยังขาดความเอาใจ

ใส่และไม่รับรู้ถึงผลกระทบของอาคารที่ขาดการดูแลรักษา ส่งผลไปยังความไม่แน่นอนของงบประมาณในการดูแลรักษาเพราะขาดระบบจัดการที่มีประสิทธิภาพ เริ่มตั้งแต่การขาดเอกสารสำคัญหลังการส่งมอบอาคาร เช่น คู่มือดูแลรักษางานระบบต่างๆ สอดคล้องกับผู้ให้สัมภาษณ์ระบุว่า “คู่มือสำหรับดูแลรักษาอาคารและงานระบบต้องจัดทำกันเอง ไม่ได้รับมอบเอกสารที่จำเป็นต่อการปฏิบัติงานเลยหลังจากส่งมอบอาคาร” ช่องทางการแจ้งปัญหาและติดตามผลของผู้ใช้อาคาร สอดคล้องกับผู้ให้สัมภาษณ์ระบุว่า “นักศึกษาหลังเรียนเสร็จในแต่ละรายวิชา ไม่ได้สนใจช่วยปิดเครื่องปรับอาคาร ปิดไฟ ปิดโปรเจคเตอร์ หรือแม้แต่อุปกรณ์ในห้องน้ำที่พังชำรุดก็ไม่เคยได้รับการแจ้งซ่อมจากนักศึกษาเลย” นอกจากนั้นยังขาดแคลนบุคลากรที่มีทักษะในการดูแลรักษาอาคารโดยตรง สังเกตได้จากผู้ตอบสอบถามจากหลายๆอาคาร มีวุฒิการศึกษามากกว่าระดับปริญญาตรี หลายๆท่านเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาหรือหัวหน้าภาควิชาเป็นผู้ดูแลอาคาร แสดงให้เห็นถึงการไม่ให้ความสำคัญต่อการมีอยู่ของผู้ดูแลรักษาอาคาร ผู้ดูแลรักษาอาคารบางท่านทำหน้าธุรการ ย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูแลรักษาอาคารเพราะขาดทักษะความรู้ความสามารถที่จำเป็น และยังต้องทำหลายหน้าที่ในคนๆเดียว Moseki *et al*. (2011), Richardson and Lynes (2007) พบว่าผู้บริหารระดับสูงขององค์กรไม่สนับสนุนหน่วยงานด้านการดูแลรักษาอาคารเพราะมองว่าการดูแลรักษาอาคารใช้งบประมาณที่สูง ไม่คุ้มค่า และไม่ตระหนักถึงผลกระทบของอาคารที่ขาดการดูแลรักษาอาคาร

อุปสรรคด้านการออกแบบ

อุปสรรคด้านการออกแบบส่งผลต่อการซ่อมแซมสภาพภายนอกอาคาร (β=0.413) และการซ่อมแซมอุปกรณ์และชิ้นส่วนประกอบอาคาร (β=0.399) เป็นที่แน่นอนว่าหากอาคารได้รับการออกแบบที่ไม่ดีหรือไม่เหมาะสมย่อมส่งผลต่อการดูแลรักษาอาคารอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ Al-Hammad *et al*. (1997) ระบุว่าข้อผิดพลาดจากการออกแบบอาคาร เช่น การออกแบบโครงสร้างและงานระบบท่อที่เป็นอุปสรรคต่อการเข้าถึงงานซ่อมบำรุง การออกแบบสถาปัตยกรรมโดยใช้วัสดุตกแต่งภายนอกที่ไม่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม ส่งผลต่องบประมาณที่สูงโดยไม่จำเป็นและความยากลำบากในการดูแลรักษาอาคาร Moseki *et al*. (2011) ได้ระบุว่าผู้ดูแลควรมีส่วนร่วมในขั้นตอนการออกแบบอาคารจนกระทั่งส่งมอบ เพื่อให้แน่ใจว่าเอกสารข้อมูลต่างๆที่ได้รับเพียงพอต่อการนำไปใช้ปฏิบัติงาน

แนวทางการแก้ไขอุปสรรคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลรักษาอาคาร

การที่อุปสรรคด้านงบประมาณและวัฒนธรรม ไม่มีผลกระทบโดยตรงโดยตรงกับขั้นตอนการดูแลรักษาอาคาร ไม่ได้แสดงว่าไม่สำคัญแต่เป็นไปได้ว่าทั้งสองรายการเป็นสาเหตุให้เกิดอุปสรรคด้านองค์กรและการออกแบบเช่นข้อมูลการรื้อถอนอาคารศาลฎีกาในข้างต้น การแก้ไขอุปสรรคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลรักษาอาคารจึงต้องคำนึงถึงอุปสรรคทั้งสองรายการดังกล่าวด้วย จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงปริมาณ (ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4) ร่วมกับการสัมภาษณ์ผู้ดูแลอาคาร จึงได้เสนอแนวทางในการแก้ไขอุปสรรคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลรักษาอาคาร ดังนี้

เชิงนโยบาย

กำหนดนโยบายและมาตรฐานการปฏิบัติงานของฝ่ายดูแลรักษาอาคาร ในส่วนของขั้นตอนการปฏิบัติงานที่ยังเป็นปัญหาต้องมีผู้เชี่ยวชาญเข้ามาดูแลรักษาอาคารในด้านงานระบบต่างๆ และจัดทำสัญญาการดำเนินงานซ่อมบำรุงเป็นประจำทุกปี เช่น เช็ดกระจก ทำความสะอาดในที่สูง ทาสี เป็นต้น ให้ชัดเจนเช่นเดียวกับสัญญาจัดจ้างการดูแลรักษาอาคารประจำวัน

การออกแบบอาคารจำเป็นต้องจัดให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียกับอาคารทั้งฝ่ายผู้ใช้อาคารได้แก่ผู้บริหาร เจ้าหน้าที่ และผู้ใช้อาคารทั่วไป และฝ่ายดูแลรักษาอาคาร ร่วมกันแสดงความคิดเห็นในเรื่องการใช้ประโยชน์ของอาคารเพื่อการใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพอาคารสำหรับฝ่ายผู้ใช้อาคารและเพื่อการปฏิบัติงานดูแลรักษาอาคารของฝ่ายดูแลรักษาอาคาร

พัฒนาความรู้ความสามารถผู้ดูแลอาคารในการดูแลรักษาอาคารให้เหมาะสมและได้มาตรฐานหรือแต่งตั้งผู้ที่มีความรู้ด้านการดูแลรักษาอาคารโดยเฉพาะเข้ามาดำเนินงาน

การปฏิบัติงาน

ฝ่ายปฏิบัติงานต้องประเมินสภาพความเสียหายของอาคารและได้รับความพึงพอใจจากผู้ใช้อาคารเป็นประจำทุกปี เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการจัดตั้งงบประมาณการดูแลรักษาอาคาร และเพื่อเป็นการวางแนวทางในอนาคตสำหรับอาคารที่สร้างใหม่

ข้อจำกัดของการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีข้อจำกัดหลายประการ ประการแรกกลุ่มตัวอย่างของการศึกษาในครั้งนี้มีจำนวนไม่มาก เนื่องมาจากจำนวนประชากรมีไม่เพียงพอ จึงไม่สามารถใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างตามหลักสถิติได้ ประการที่สอง แบบสอบถามที่ใช้ในการเก็บข้อมูลในครั้งนี้ ผู้ตอบแบบสอบถามเป็นผู้รายงานข้อมูลโดยตรง (Self – Report) ประการสุดท้ายคือเรื่องผลการศึกษาแม้ว่าจะมีการเสนอแนวทางการแก้ไขอุปสรรคที่มีผลต่อการดูแลรักษาอาคารไว้ในช่วงท้ายของการศึกษา หากแต่ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าแนวทางดังกล่าวจะก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการดูแลรักษาอาคารมากน้อยเพียงใด เนื่องจากความแตกต่างของสภาพและข้อจำกัดของการดูแลรักษาอาคารแตกต่างกันออกไปตามแต่ละอาคาร การศึกษาต่อไป อาจจะมุ่งเน้นไปที่การเก็บข้อมูลการปฏิบัติงานขององค์กรโดยตรง เพื่อจะหาสาเหตุที่องค์กรเป็นอุปสรรคหลักต่อการดูแลรักษาอาคารอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงพาณิชย์. 2554. **ขอบเขตงานจ้างบริหารจัดการอาคารกระทรวงพาณิชย์ประจำปีงบประมาณ 2554**. แหล่งที่มา: http://www2.moc.go.th/download%2Ftor%2Fattach%2 Fmanage%202.pdf, 27 พฤศจิกายน 2557.

กองแผนงานมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2553. **ข้อมูลมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ปีการศึกษา 2553**. แหล่งที่มา: http://www.planning.ku.ac.th/planning/downloads/kuprofile2010.pdf, 27 พฤศจิกายน 2557.

กองแผนงานมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2554. **ข้อมูลมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ปีการศึกษา 2554**. แหล่งที่มา: http://www.planning.ku.ac.th/planning/downloads/kuprofile2011.pdf, 27 พฤศจิกายน 2557.

กองแผนงานมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2555. **ข้อมูลมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ปีการศึกษา 2555**. แหล่งที่มา: http://www.planning.ku.ac.th/planning/downloads/kuprofile2012.pdf, 27 พฤศจิกายน 2557.

กองแผนงานมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2556. **ข้อมูลมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ปีการศึกษา 2556**. แหล่งที่มา: http://www.planning.ku.ac.th/planning/downloads/kuprofile2013.pdf, 27 พฤศจิกายน 2557.

ส่วนอาคารและสถานที่สำนักงานอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. **คู่มือทำความสะอาดอาคารภายในมหาวิทยาลัยกลุ่มที่ 1**. แหล่งที่มา:http://www.kmutt.ac.th /building/pdf/manual_g1.pdf, 27 พฤศจิกายน 2557.

อัญชลี เพ็งแข. 2556. **การประเมินความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมของอาคารเดิม: กรณีศึกษาอาคาร. มหาวิทยาลัยภาครัฐ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อธิการบดีศิลปากร ออกจดหมายถึงประธานศาลฎีกา ขอให้ระงับรื้อถอนอาคาร-จัดเวทีฟังความ. (9 พฤษภาคม 2556). **วารสารเมืองโบราณ**. สืบค้นจากhttp://www.cheewajit.com/articleView.aspx?cateId=2&articleId=2032

Al-Hammad, A., S. Assaf and M. Al-Shihah. 1997. The Effect of Faulty Design on Building Maintenance. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**. 3(1): 29-39.

Council, U.S.G.B. 2009.**Leed 2009 for Existing Building: Operation & Maintenance**. Available Source: http://www.usgbc.org/ShowFile.aspx?DocumentID=5545, 6 May 2015.

Dahle, M. and E. Neumayer. 2001. Overcoming Barriers to Campus Greening: A Survey among Higher Educational Institutions in London, Uk. **International Journal of Sustainability in Higher Education**. 2(2): 139-160.

English Heritage. **Grant for Historic buildings, Monument and Designed landscapes :Maintenance Plan.** Available Source: https://www.english-heritage.org.uk/content/imported-docs/f-j/hbmdl-maintenance-plan, 1 August 2015.

Lind, H. and H. Muyingo. 2012. Building Maintenance Strategies: Planning under Uncertainty. **Property Management**. 30(1): 14-28.

Moseki, L.K., E. Tembo and C.E. Cloete. 2011. **The** Principles and Practice of Facilities Maintenance in Botswana. **Journal of Corporate Real Estate**. 13(1): 48-63.

Richardson, G.R.A. and J.K. Lynes. 2007. Institutional Motivations and Barriers to the Construction of Green Buildings on Campus: A Case Study of the University of Waterloo, Ontario. **International Journal of Sustainability in Higher Education**.8(3): 339-354.

U-HAB and HPD.**A Guide to Building Maintenance and Repair**. Available Source: http://www.uhab.org/sites/default/files/doc_library/Building_Repair.pdf, 26 November 2014.

Williams, K. and C. Dair. 2007. What Is Stopping Sustainable Building in England? Barriers Experienced by Stakeholders in Delivering Sustainable Developments. **Sustainable Development**. 15(3): 135-147.

การศึกษาผลกระทบของตัวความต้านทานปรับหน้าคลื่นที่มีผลต่อค่าแรงดันพุ่งเกินของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50μs

The Effects of the Front Resistor that Affect Overshoot of 1.2/50 μs Impulse Voltage Waveform

กวิตม์ มีเจริญ[1*] และ ศุภกิตติ์ โชติโก[1]

Kavit Meecharoen[1*] and Supakit Chotigo[1]

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการแก้ปัญหาแรงดันพุ่งเกิน(Overshoot) ของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ สาเหตุหลักมาจากการออสซิลเลชั่น (Oscillation) ของวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ พบว่าตัวแปรหลักที่ทำให้เกิดการออสซิลเลชั่นของรูปคลื่นคือค่าความเหนี่ยวนำ (L) ที่มีอยู่ในค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ดังนั้นเพื่อลดความเหนี่ยวนำ บทความนี้ได้ออกแบบตัวต้านทานโดยนำลวดความต้านทานแต่ละขนาดมาพันโดยใช้วิธีการพันสวนทางกันเพื่อให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนั้นหักล้างกัน หลังจากนั้นนำตัวต้านทานที่ได้ไปขนานกัน 2 ตัวอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานตามที่ 18 Ω, 21 Ω, และ 25 Ω โดยค่าความเหนี่ยวนำที่มีค่าตั้งแต่ 1.8-7.0 μH โดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในปัจจุบันมีตัวต้านทานหน้าคลื่น ซึ่งมีค่า R = 18 Ω, L = 4 μH และมีแรงดันพุ่งเกินอยู่ที่ 10.4% ในบทความนี้ได้ทำการปรับค่าความต้านทานตามที่ได้กล่าวมาและพบว่า ค่าความต้านทาน R = 25 Ω, L = 2.5 μH มีผลของค่าแรงดันพุ่งเกินมีค่าลดลงเหลือ 0.3% จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวความต้านทานปรับหน้าคลื่นที่มีออกแบบใหม่นั้นช่วยแก้ปัญหาค่าแรงดันพุ่งเกินที่เกิดขึ้นในวงจรแรงดันอิมพัลส์ได้

ABSTRACT

This paper presents the method to solve the overshoot of 1.2/50 us impulse voltage waveform of the impulse voltage generator. The main cause is due to oscillation of impulse voltage generator circuit. The main variable for causing the oscillation is the inductance of the front resistor (R_d). Therefore, to reduce this inductance, this paper designs the new front resistor by wiring the resistance wire each size in opposite way then connecting two of the new resistor in parallel to get the front resistor with the value of 18 Ω, 21 Ω, and 25 Ω. These resistors have the value of inductance in the range of 1.8-7.0 μH. The existing impulse voltage generator uses the front resistor which has R = 18 Ω, L = 4 μH. And, it has the overshoot of 10.4%. This paper changes the value of this front resistor and finds that the front resistor with the value of R = 25 Ω, L =2.5 μH. The overshoot also reduces to 0.3%. Finally, it can concludes that the new front resistor design can reduce the overshoot of impulse voltage waveform in the impulse voltage generator.

Key words: Impulse Voltage, Overshoot, Inductance

* Corresponding author; e-mail address: **kavit.mee@gmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 10140

[1]Department of Electical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi 10140

คำนำ

ปัจจุบันเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์4ชั้นขนาด 400 kV 8 kJ [3] ที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนและใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆซึ่งในรูปคลื่นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีผลของการเกิดออสซิลเลชั่น(Oscillation) และแรงดันพุ่งเกิน (Overshoot) โดยมีอัตราส่วนค่าแรงดันพุ่งเกินอยู่ที่ 10.4% ซึ่งมีค่าองค์ประกอบต่างๆในวงจรดังนี้ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ (C_s) ในแต่ละชั้นเท่ากับ 0.4 μF, ตัวเก็บประจุโหลด (C_b) เท่ากับ 5 nF,ความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ในแต่ละชั้นเท่ากับ 18 Ω, และความต้านทานปรับหางคลื่น (R_e) ในแต่ละชั้นเท่ากับ 180 Ω โดยทดสอบที่ค่าระดับแรงดันต่างๆดังรูปที่ 1 ซึ่งในความต้านทานนั้นจะมีค่าความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นด้วยจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์เกิดการออสซิลเลชั่นและการเกิดแรงดันพุ่งเกิน

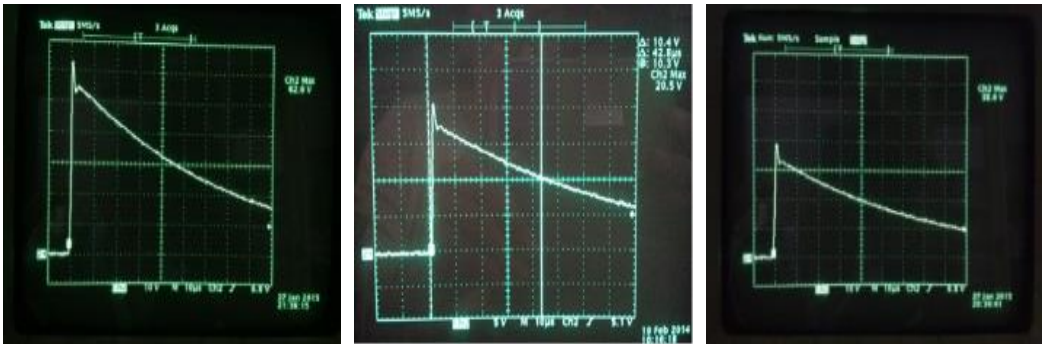


Figure 1 effect overshoot of impulse voltage wave form

ด้วยเหตุนี้ จึงนำไปสู่การวิจัยศึกษาผลกระทบของตัวต้านทานปรับรูปคลื่นที่ส่งผลต่อแรงดันพุ่งเกินของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs เพื่อจะได้แก้ปัญหาแรงดันพุ่งเกินที่เกิดขึ้นในรูปคลื่น โดยจะทำการศึกษาและแก้ไขผลกระทบของการเกิดค่าแรงดันพุ่งเกินในระบบเครื่องกำเนิดแรงดันที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของระบบเครื่องกำเนิด ทั้งนี้เพื่อจะได้นำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาในการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมส์พัลส์หลายขั้น

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ตามหลักการของวงจรมาร์กซ์ (Marx's circuit) (สำรวย , 2549) ดังรูปที่ 2 ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจร จะเหมือนกับวงจรพื้นฐานในวงจรรูปที่ 1 ตัวเก็บประจุ C_s' ทุกตัวจะได้รับการอัดประจุในลักษณะที่ต่อกันแบบขนานด้วยแรงดัน U_0' เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ผ่านไกสวิตช์ ทำให้สปาร์กแกปของขั้นแรกทำงานก่อน สปาร์กแกปขั้นต่อๆไปก็จะเกิดสปาร์กตามลำดับ เป็นผลให้ตัวเก็บประจุ C_s' ทั้งหมดต่อกันแบบอนุกรม และได้แรงดันสูงเป็นทวีคูณของจำนวนขั้น เมื่อสปาร์กแกปเกิดสปาร์กหมดทุกคู่ C_s' จะต่อกันเป็นอนุกรม ฉะนั้น C_b จะได้รับประจุผ่านความต้านทานหน่วง R_d' ต่อกันแบบอนุกรม และในที่สุดทั้ง C_s' และ C_b ต่างก็จะดีสชาร์จปล่อยประจุผ่าน R_e' และ R_d' ต่อไป ค่าองค์ประกอบต่างๆ ถ้าคิดเทียบให้เป็นวงจรขั้นเดียว ดังวงจรพื้นฐานจะได้ค่ารวมดังนี้

ความสัมพันธ์ของขนาดแรงดันที่สามารถสร้างได้ดังสมการที่ (1)

$$U_0 = nU_0' \quad (1)$$

ความสัมพันธ์ของค่าเก็บประจุอิมพัลส์ต่อชั้นดังสมการที่ (2)

$$C_s = \frac{C_s'}{n} \tag{2}$$

ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่นและหลังคลื่นดังสมการที่ (3) และ (4)

$$R_d = nR_d' \tag{3}$$

$$R_e = nR_e' \tag{4}$$

เมื่อ U_0 คือ ค่าแรงดันอัดประจุกระแสตรง U_0' คือ ค่าแรงดันอัดประจุกระแสตรงต่อขั้น

C_s คือ ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ C_s' คือ ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ต่อขั้น

n คือ จำนวนขั้น C_b คือ ค่าเก็บประจุโหลด

R_d คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d' คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่นต่อขั้น

R_e คือ ความต้านทานปรับหางคลื่น R_e' คือ ความต้านทานปรับหางคลื่น

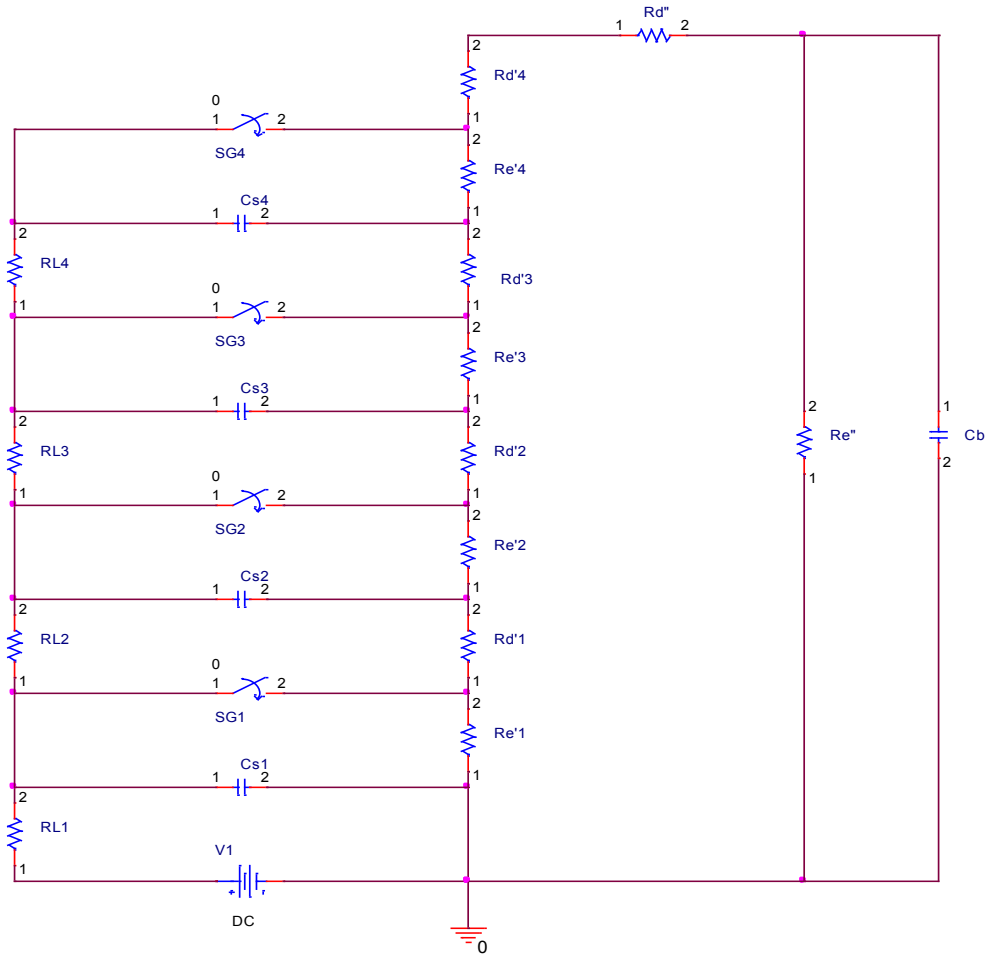


Figure 2 circuit impulse voltage generator 4 step by OrCAD program

การคำนวณหาความต้านทานปรับรูปคลื่น

ตัวต้านทานที่ทำหน้าที่ปรับหน้าคลื่น R_d และปรับหางคลื่น R_e จะกำหนดด้วยรูปคลื่น 1.2/50 μs ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ C_s และค่าเก็บประจุโหลด C_b ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการสามารถคำนวณความต้านทานของช่องคาบเวลาหน้าคลื่น(T_1)ได้ตามสมการที่ (5)

$$T_1 = k_2 R_d \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (5)$$

และสามารถคำนวณความต้านทานของช่วงคาบเวลาหลังคลื่น(T_2) ได้ตามสมการที่ 6

$$T_2 = k_1 R_e (C_b + C_s) \quad (6)$$

ซึ่งค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับรูปคลื่น โดยที่ค่า k_1 และ k_2 ในรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs นั้นจะมีค่าคงตัวดังนี้

$k_1 = 0.73$ และ $k_2 = 2.96$

การคำนวณที่กล่าวมาข้างต้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ (L) ในทางปฏิบัติรูปคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากทฤษฎีโดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและค่ายอดแรงดัน เนื่องจากค่าความต้านทานที่ทำขึ้นมานั้นมักจะมีค่าความเหนี่ยวนำเกิดขึ้นซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยค่าความเหนี่ยวนำนี้จะทำให้เกิดออสซิลเลชั่นได้ และจะเกิดผลมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำที่มีอยู่ซึ่งจะต้องมีการคำนวณค่าความต้านทาน R_d นั้นใหม่ได้ตามสมการที่ (7)

$$R_d \geq 2\sqrt{L\left(\frac{C_b + C_s}{C_b C_s}\right)} \quad (7)$$

การพันตัวความต้านทาน R_d และ R_e

ความต้านทานของ R_d และ R_e มีคุณสมบัติคือการปรับรูปคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งควรที่จะต้องออกแบบเพื่อให้ไม่ให้มีค่าความเหนี่ยวนำหรือให้มีค่าความเหนี่ยวนำให้น้อยที่สุด และสามารถทนค่ากำลังไฟฟ้าให้ได้ (สำรวย , 2535) โดยการออกแบบความต้านทานจะให้ลวดความต้านทานเปลือยมาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ความต้านทานที่เหมาะสมและลดค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากภายในขดลวด จากนั้นให้นำมาพันบนกระบอกแกนพีวีซี และระหว่างชั้นการพันของขดลวดต้องขั้นด้วยฉนวนซึ่งจะใช้เส้นเอ็นไนล่อน โดยพันสองชั้นสวนทางกันเพื่อเป็นการลดค่าความเหนี่ยวนำให้หักล้างกัน เมื่อพันชั้นแรกเรียบร้อยจะต้องขั้นด้วยฉนวนที่สามารถทนกำลังไฟฟ้าสูงๆได้แล้วจึงพันชั้นที่สอง และในการพันแต่ละชั้นต้องให้ได้ค่าความต้านทานให้ใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อที่ให้กระแสไฟฟ้าในแต่ละชั้นไหลผ่านได้เท่าๆกัน โดยขดลวดที่ใช้ในการพันความต้านทานจะใช้ขนาดดังต่อไปนี้ดังตารางที่ 1 โดยจะมีค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำที่อยู่ในเส้นลวดต่างกันไป

Table 1 resistance and inductance of resistance wire

Size resistance wire (No.)	Resistance (Ω/m)	inductance (μH/m)
24	5.1	2.4
27	11.4	2.4
32	36.2	4.0

โดยได้มีการออกแบบให้พันตัวความต้านทานแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้

1. ใช้ลวดเบอร์ 24 พันค่าความต้านทานที่ 36 Ω, 42 Ω และ50 Ω
2. ใช้ลวดเบอร์ 27 พันค่าความต้านทานที่ 36 Ω, 42 Ω และ50 Ω
3. ใช้ลวดเบอร์ 32 พันค่าความต้านทานที่ 36 Ω, 42 Ω และ50 Ω

โดยตัวต้านทานที่พันขึ้นมาจะต้องมีความทนต่อพลังงานที่ไหลผ่านได้ด้วย ซึ่งพลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทานที่เกิดขึ้นในเวลาสั้นๆนั้นทำให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้น ขดลวดที่ใช้จึงจำเป็นต้องทนพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นได้ด้วย โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$W = mc\Delta T \tag{8}$$

เมื่อ W คือ พลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทาน (kJ)

m คือ มวลสารของเส้นลวดที่ประกอบเป็นความต้านทาน

c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg°K)

ΔT คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็น °C

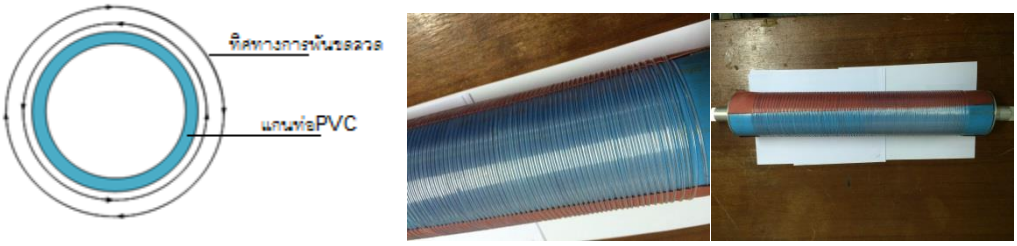


Figure 3 structure wiring of resistance wire

การติดตั้งค่าความต้านทาน

หลังจากพันตัวความต้านทานเรียบร้อยแล้วจะต้องติดตั้งตัวความต้านทาน โดยให้ตัวความต้านทานทั้ง 2 ตัวขนานกันในแต่ละชั้นเพื่อที่จะได้ค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น (R_d) ดังรูปที่ 4 เพราะด้วยขนาดลวดเบอร์ 27 และ 32 ที่ใช้พันตัวความต้านทานนั้นมีขนาดเล็กทำให้ทนพลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทานไม่เพียงพอ จึงต้องทำการขนานตัวความต้านทานดังกล่าว

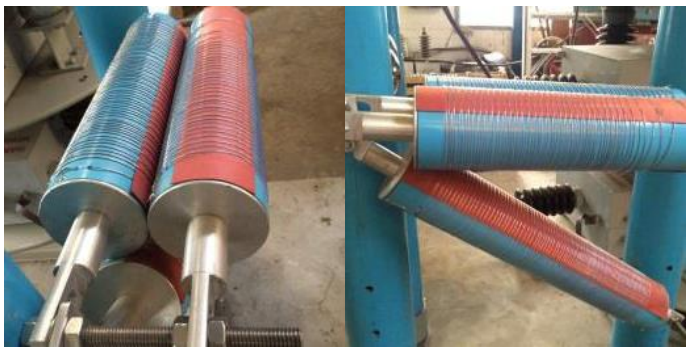


Figure 4 installation resistor

เมื่อนำตัวต้านทานที่มีค่า 36 Ω ,42 Ω และ 50 Ω มาขนานกันได้ค่าความต้านทานตามค่าที่กำหนดซึ่งจะได้ค่าความเหนี่ยวนำดังตารางที่ 2 โดยค่าที่18 Ω ใช้ค่าความต้านทานจากวงจรเดิม ค่าที่21 Ω ได้จากการคำนวณหาสมการที่ (5) และค่าที่25 Ω ได้จากการทดลองโดยใช้ข้อมูลตามทฤษฎีสมการที่ (7) ซึ่งจะต้องนำค่าพารามิเตอร์นี้ไปใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมเพื่อสังเกตุลักษณะของรูปคลื่นก่อนนำไปทดลองจริงกับชุดเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

Table 2 resistance and inductance from wiring of resistance wire

Size resistance wire (No.)	Resistance of resistor	Inductance of resistor	Parallel resistance	Parallel inductance
24	36 Ω	8 μH	18 Ω	4 μH
	42 Ω	11 μH	21 Ω	5.5 μH
	50 Ω	14 μH	25 Ω	7 μH
27	36 Ω	6 μH	18 Ω	3 μH
	42 Ω	7 μH	21 Ω	3.5 μH
	50 Ω	8 μH	25 Ω	4 μH
32	36 Ω	3.5 μH	18 Ω	1.8 μH
	42 Ω	4 μH	21 Ω	2 μH
	50 Ω	5 μH	25 Ω	2.5 μH

ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการคำนวณค่าความต้านทานตามสมการที่(5)และ(6)โดยมีค่าองค์ประกอบต่างดังนี้ C_s = 0.4μFและ C_b = 20nF จะได้ค่า R_d = 21.2Ω และค่า Re = 163.0 Ω ซึ่งจะได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน โดยลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานนั้นจะเป็นลักษณะของรูปคลื่นที่ไม่มีผลของการเกิดออสซิลเลชั่นเกิดขึ้น(IEEE Std4 , 2013)

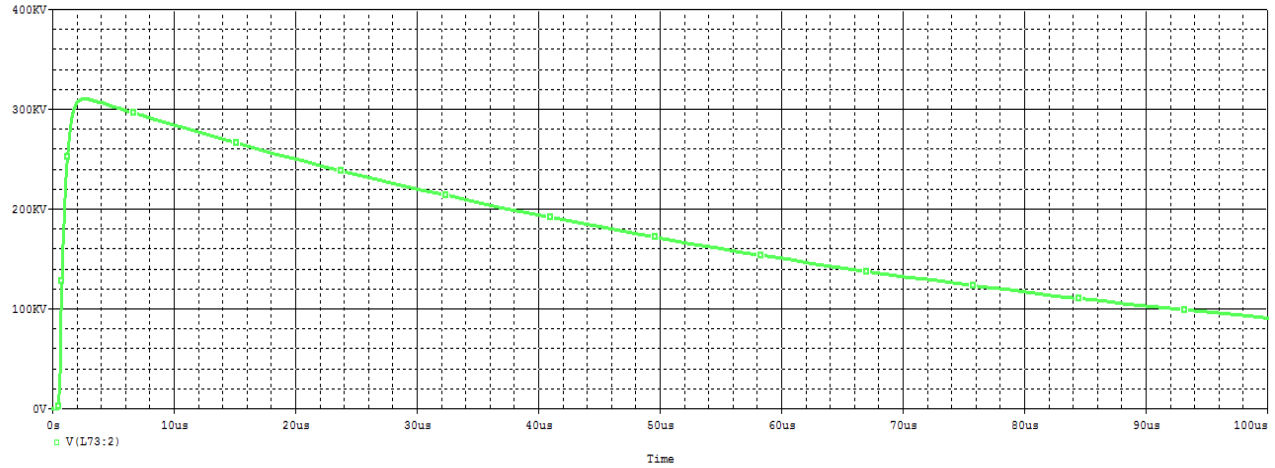


Figure 5 impulse voltage waveform without oscillations or overshoots calculate by equation

เมื่อจำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์พื้นฐานโดยใช้โปรแกรม ORCAD โดยค่าองค์ประกอบต่างๆที่ได้จากการคำนวณนั้นจะไม่มีค่าความเหนี่ยวนำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยลักษณะของรูปคลื่นจึงเป็นดังรูปที่ 5 ซึ่งในความเป็นจริงแล้วจะต้องมีค่าความเหนี่ยวนำที่อยู่ในตัวต้านทานที่พันอยู่ด้วย จากตารางที่ 2 จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในการจำลองการสร้างแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs โดยใช้โปรแกรม ORCAD โดยเปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 6-8 และสามารถหาอัตราส่วนของแรงดันพุ่งเกินได้จากสมการที่ (9) (M.Hinow,2010)

$$\beta' = \frac{U_e - U_b}{U_e} \quad (9)$$

เมื่อ U_e คือ ค่าแรงดันทดสอบสูงสุดที่วัดได้

U_b คือ ค่าแรงดันสูงสุดพื้นฐาน(จำลองจากโปรแกรม)

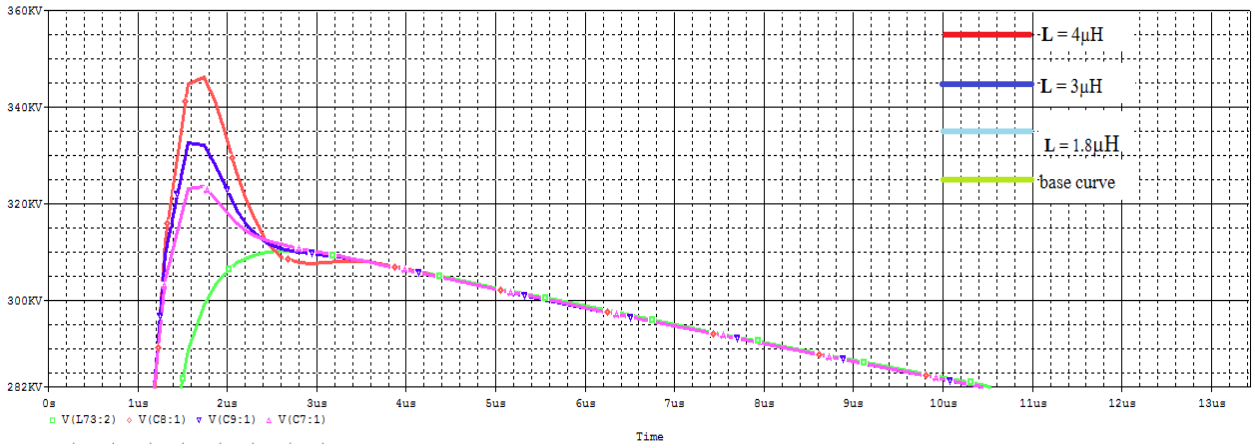


Figure 6 impulse waveform of resistance 18Ω L=4μH, L=3μH, L=1.8μH

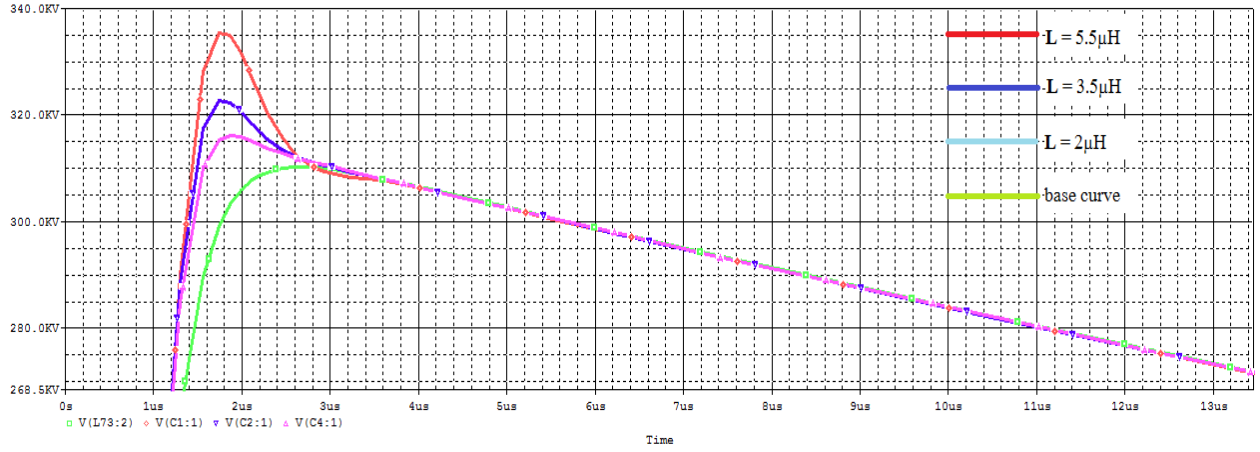


Figure 7 impulse waveform of resistance 21Ω L=5.5μH, L=3.5μH, L=2μH

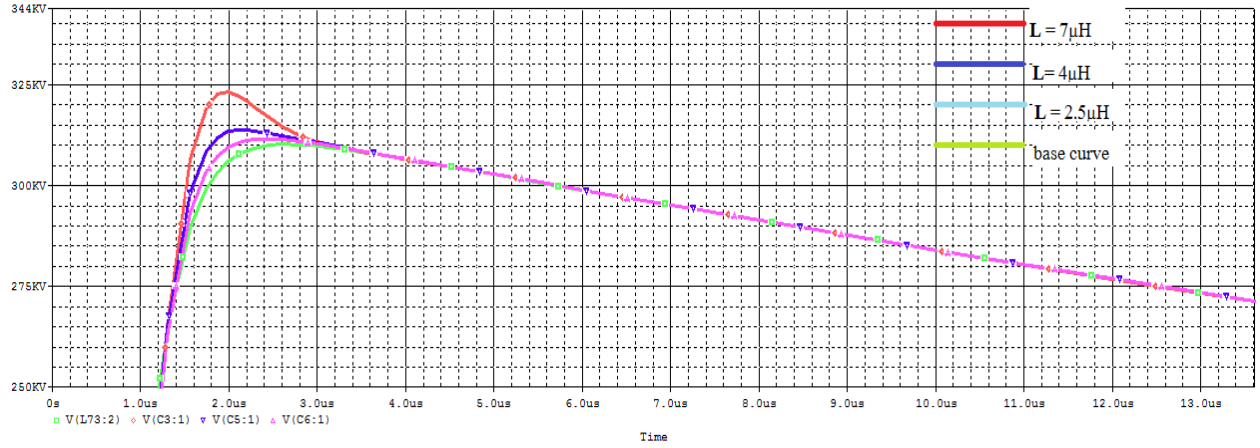


Figure 8 impulse waveform of resistance 25Ω L=7μH, L=4μH, L=2.5μH

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

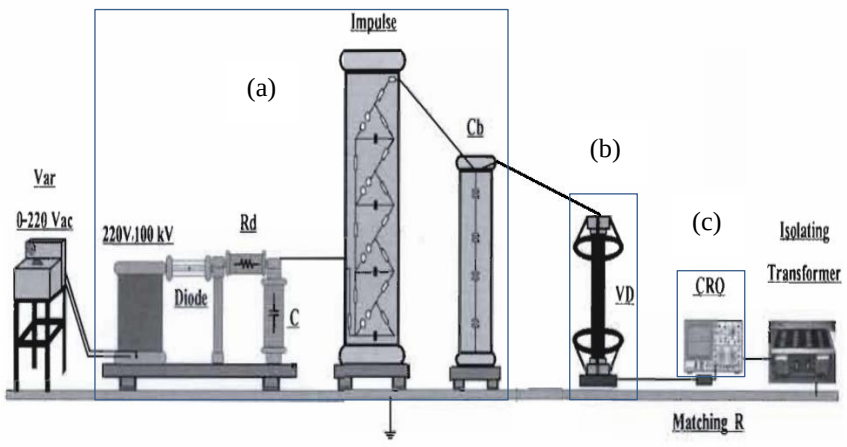


Figure 9 testing circuit

(a) Impulse generator 4 ชั้น ขนาด 400kV 8kJ

(b) Voltage divider ratio = 5000 : 1 Volt

(c) Oscilloscope Tektronix TDS 340

(d) LCR Meter ANDO TYPE AG-4311

ขั้นตอนการทดสอบ

เริ่มโดยการตรวจสอบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพลส์ให้พร้อมใช้งาน หลังจากนั้นตั้งค่าระยะแกปทรงกลมให้ได้แรงดันตามที่ต้องการแล้วจ่ายแรงดันอิมพัลส์เพื่อเก็บผลการทดสอบที่ค่าแรงดันต่างๆ เมื่อทำการเก็บข้อมูลแล้วให้ทำการเปลี่ยนตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นที่ได้เตรียมไว้ เพื่อจ่ายแรงดันอิมพัลส์แล้วเก็บผลทดสอบที่ค่าแรงดันต่างๆต่อไปจนครบ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

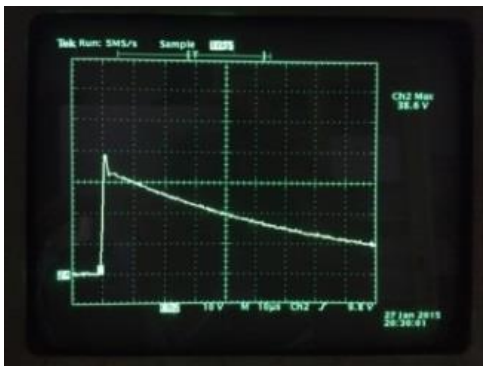


Figure 10 waveform recorded

R = 18 Ω, L = 4 μH

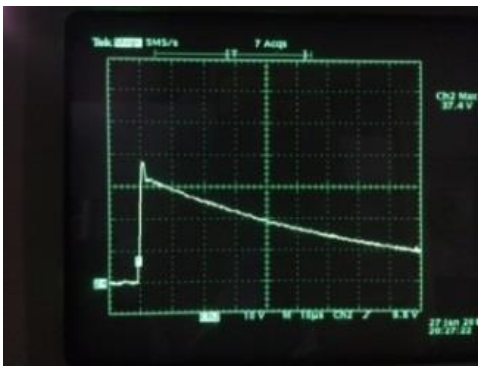


Figure 11 waveform record

R = 18 Ω, L = 3 μH

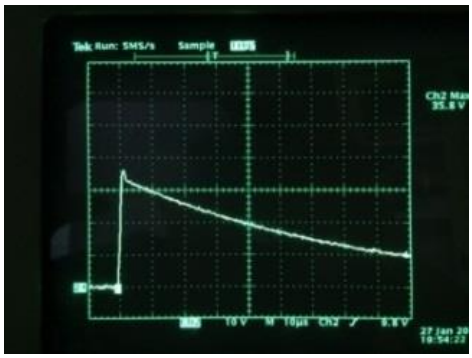


Figure 12 waveform record

R = 21 Ω, L = 2 μH

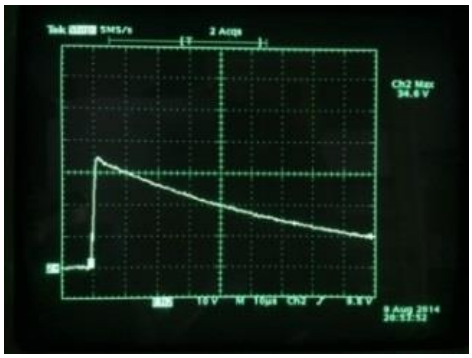


Figure 13 waveform record

R = 25 Ω, L = 2.5 μH

หลังจากได้ทำการจำลองผลโดยให้โปรแกรมOrCADได้พบว่าลักษณะของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ค่าของแรงดันพุ่งเกินนั้นลดลงและเมื่อนำตัวต้านทานมาใช้ในวงจรจริงซึ่งจากรูปที่ 10 ลักษณะของรูปคลื่นนั้นมีค่าแรงดันพุ่งเกินสูงถึง 10.4% และเมื่อใช้ค่าความต้านทานที่ออกแบบโดยลดผลของค่าความเหนี่ยวนำลง18 Ω, 21 Ω และ25 Ω ผลของแรงดันพุ่งเกินมีค่าลดลงที่ 6.1%, 1.9%และ 0.3% ตามรูปที่ 11-13 โดยสามารถหาอัตราส่วนของแรงดันพุ่งเกินได้จากสมการที่(9)

Table 3 Comparison ratio overshoot with base curve by OrCAD program

Size resistance wire (No.)	resistance	inductance	U_e(kV)	T_1/T_2(μs)	Overshoot ratio
24	18 Ω	4 μH	346	0.8/48.8	10.4%**
	21 Ω	5.5 μH	334	0.8/56.2	7.2%
	25 Ω	7 μH	323	1.0/54.6	4.0%
27	18 Ω	3 μH	330	0.8/48.4	6.1%
	21 Ω	3.5 μH	321	0.8/56.2	3.4%
	25 Ω	4 μH	313	1.1/54.4	1.0%
32	18 Ω	1.8 μH	323	0.8/48.4	4.0%
	21 Ω	2 μH	316	0.8/56.4	1.9%
	25 Ω	2.5 μH	311	1.1/54.6	0.3%

** parameter of impulse waveform recorded R = 18 Ω, L = 4 μH

สรุป

1. จากผลการจำลองด้วยโปรแกรมสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันเมื่อนำไปใช้ในวงจรเครื่องกำเนิดอิมพัลส์จริง
2. ตัวต้านทานที่ออกแบบขึ้นมาใหม่สามารถลดอัตราส่วนค่าแรงดันพุ่งเกินจาก 10.4%เหลือ 0.3%
3. ขนาดขดลวดและลักษณะการพันตัวต้านทานมีผลช่วยลดความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

IEEE Std4 2013. **Standard Techniques for High Voltage Testing**.

สำรวย สังข์สะอาด 2535. **การพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์** 400kV 1 kJ. วิศวกรรมสารเล่มที่ 4 หน้า 80-87

สำรวย สังข์สะอาด. 2549. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

M. Hinow. 2010. Lightning Impulse Voltage and Overshoot Evaluation Proposed in Drafts of IEC 60060-1 and Future UHV Testing. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17**, No. 5

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์
และวิศวกรรมศาสตร์

Subject: Architecture and Engineering

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

การออกแบบและพัฒนาระบบรักษาตำแหน่งและหลบหลีกการชนสำหรับอากาศหลายใบพัด ในสภาพแวดล้อมที่กำหนด โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพ

Design and Development of the Position Holding and Collision Avoidance System for Multirotor in a Fixed Environment Using Image Processing Techniques

ธนกร ขำวิไล[1*] ภานุกร แซ่ตัน[1] และ ไชยวัฒน์ กล่ำพล[1]

Thanakorn Khamvilai[1*], Panukorn Seantan[1] and Chaiwat Klampol[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบรักษาตำแหน่ง และหลบหลีกการชนสำหรับอากาศยานหลายใบพัด โดยใช้การประมวลผลภาพจากกล้องที่ติดตั้งบนเครื่องเป็นระบบเสริม และทำการทดสอบการใช้งานจริงของระบบ ในสภาพแวดล้อมควบคุม ระบบรักษาตำแหน่งจะรักษาระยะห่างที่ต้องการจากวัตถุโดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี ส่วนระบบหลบหลีกการชนจะหยุดการเคลื่อนที่และรักษาตำแหน่งของอากาศยาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบตรวจจับวัตถุและระยะห่างรวมถึงระบบรักษาเสถียรภาพและควบคุมอัตโนมัติ และจำลองผลตอบสนองของอากาศยาน จากนั้นจึงประยุกต์ใช้กับอากาศยานจริง ในการทดลองอากาศยานจะรักษาตำแหน่งที่ 2 ระยะห่าง ได้แก่ 3 เมตร และ 4 เมตร จากวัตถุ อีกทั้งยังทดสอบระบบหลบหลีกการชนโดยให้นักบินควบคุมเครื่องในทิศทางมุ่งเข้าหาวัตถุ สำหรับผลการทดลองพบว่าอากาศยานสามารถแยกแยะระหว่างสิ่งกีดขวางกับพื้นหลัง และรักษาตำแหน่งตามระยะที่กำหนดได้ โดยความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ±1 เมตร จากระยะทดสอบทั้ง 3 เมตร และ 4 เมตร นอกจากนี้ยังสามารถยกเลิกคำสั่งจากนักบิน และหยุดการเลื่อนที่เองได้

ABSTRACT

This research aims to design, and develop a position holding and collision avoidance systems for multirotor by applying the image processing techniques, using an onboard camera, as an additional sensor system other than accelerometers and rate gyro sensors. The position holding system focused on reserving an arbitrary distance from the object using PID control. The collision avoidance system concentrated on precluding the machine from crashing a target by halting its motion while maintain the position with stabilization. The object detection system, mathematical model and respond simulations of the aircraft were devised before actual experiments. This multirotor had to retain its position in 2 distances---3 and 4 meters---away from the obstacle. Then, the pilot controlled the vehicle direct to the obstacle. The results showed that this vehicle automatically distinguished between the obstacle and the background, sustained its position within an error of ±1 meter at both distance---3m and 4m, and took the authority over pilot's signals, obviating imminent incidents.

Key Words: multirotor, PID control, position holding, collision avoidance, image processing

Corresponding author; e-mail address: ThanakornKhamvilai@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในอดีตอากาศยานหลายใบพัด(multirotor aircrafts) หรือมัลติโรเตอร์นั้น เป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้งานในหลายด้าน เช่นทางการทหาร การสำรวจสภาพอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา (D. John *et al*., 2015) แต่ในปัจจุบัน ด้วยเทคโนโลยีตัวรับรู้หรือเซนเซอร์ที่พัฒนาแบบก้าวกระโดด ทำให้มัลติโรเตอร์ราคาถูกลงมากจนทำให้ทุกหน่วยงานสามารถเข้าถึงได้โดยง่าย สามารถพบเห็นได้ทั่วไป เช่น งานสำรวจป่าไม้, พื้นที่บุกรุก, สัตว์ป่า, ทรัพยากรธรรมชาติ, สิ่งก่อสร้าง, งานถ่ายภาพจากมุมสูง และงานสำรวจอื่นๆ สำหรับในการใช้งานภายนอกเหล่านี้ระบบรักษาตำแหน่งเดิมสามารถทำงานอย่างแม่นยำโดยใช้ข้อมูลจากจีพีเอช (GPS) (G. Justin, 2012)

ถึงอย่างไรก็ตามการใช้มัลติโรเตอร์ในประเทศไทยนั้น ส่วนมากยังต้องพึ่งพาร้านอุปกรณ์เครื่องบินเล็ก ซึ่งมีแค่ระบบรักษาเสถียรภาพและระดับความสูง แต่การบินในอาคารมีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้ระบบจีพีเอชได้และมีสิ่งกีดขวางมาเป็นอุปสรรคในการบินอีก ซึ่งการบินในอาคารมีความจำเป็นมากเช่น การช่วยเหลือผู้ประสบภัยที่ติดอยู่ในส่วนของอาคารที่ไม่สามารถเข้าไปสำรวจได้ นอกจากนี้การที่อากาศยานยังขาดความสามารถในการรับรู้และมองเห็นอาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุต่างๆ เช่น พุ่งชนต้นไม้, อาคาร, สัตว์ หรือกระทั่งผู้คน (D. John *et al*., 2015) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีแนวคิดในการนำระบบประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้กับอากาศยานมัลติโรเตอร์

ระบบการประมวลผลภาพนั้นเป็นเทคโนโลยีสารสนเทศที่ใช้งานกันมานานกว่า 10 ปีแล้ว (Gonzalez *et al*., 2007) โดยเบื้องต้นเป็นการนำภาพนิ่งมาทำการปรับแต่งความสว่างและความคมชัดเท่านั้น แต่ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นการประมวลผลภาพสามารถทำได้ถึงการนำภาพถ่าย หรือกระทั่งวีดิโอมาประมวลผลแล้วสามารถบอกข้อมูลในภาพนั้นได้ เช่น การถ่ายภาพรหัสไปรษณีย์เพื่อเข้าเครื่องคัดแยก, การจดจำลายนิ้วมือเพื่อทำระบบสแกนลายนิ้วมือ และการตรวจจับความเร็วของรถที่วิ่งบนท้องถนนเป็นต้น แต่การประยุกต์ใช้ในอากาศยานมัลติโรเตอร์นั้นยังไม่แพร่หลายมากนัก (D. John *et al*., 2015)

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ คณะผู้จัดทำจึงได้ให้ความสนใจในการออกแบบระบบรักษาตำแหน่ง และป้องกันการชนโดยใช้การประมวลภาพ เพื่อมาศึกษาผลตอบสนองของมัลติโรเตอร์เมื่อทำการบินรักษาตำแหน่งอยู่ข้างหน้าสิ่งกีดขวาง โดยในเบื้องต้นการทดลองนั้นจะทำการทดสอบบินในห้องที่มีสภาพแวดล้อมปิด และมีสิ่งกีดขวางเพียงที่ทราบขนาดเพียงหนึ่งชิ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ได้ในภารกิจต่างๆ เช่น การสำรวจสายส่งไฟฟ้า, การป้องกันการชนต้นไม้ในการสำรวจป่า, การเข้าสู่เป้าหมายอัตโนมัติ, การเติมน้ำมันด้วยตนเอง, การช่วยเหลือนักบินในการลงจอด และการขนส่งอาหาร (G. Justin, 2012)

อุปกรณ์และวิธีการ

การประกอบอากาศยานมัลติโรเตอร์, จัดทำสภาพแวดล้อม และทดสอบการบินเบื้องต้น

นำอุปกรณ์ต่างๆซึ่งคล้ายกับกับทดลองของ D. John *et al*. (2015) และ G. Justin (2012) เช่น กล้อง, วงจรควบคุม, มอเตอร์, ตัวรับสัญญาณจากรีโมท, โครงอากาศยาน, ใบพัด และแบตเตอร์รี่ มาประกอบกันขึ้นเป็นลำมัลติโรเตอร์ (Figure 1) และทดสอบบิน ในห้องขนาดกว้าง 12 เมตร ยาว 18 เมตร และสูง 2.5 เมตร ซึ่งทำการควบคุมแสงสว่าง, อุณหภูมิ, ไม่มีกระแสลมรบกวน และใช้กระดานขนาดกว้าง 1.2 เมตร, ยาว 0.9 เมตร และยกสูงจากพื้น 0.8 เมตรเป็นสิ่งกีดขวาง (Figure 2) จับเวลาที่อากาศยานสามารถทำการบินได้ และตรวจสอบสภาพความสึกหรอของอุปกรณ์หลังสิ้นสุดการบิน

สำหรับตำแหน่งในการบินนั้นเลือกทำการบินที่ระยะ 3 เมตร และ 4 เมตร เนื่องจากเป็นช่วงระยะบริเวณกึ่งกลางห้องเมื่อหักลบพื้นที่ในการจัดเก็บโต๊ะ,เก้าอี้ และอุปกรณ์การเรียนอื่นๆ เช่น โปรเจคเตอร์ และกระดานออกไปแล้ว ซึ่งการบินที่ตำแหน่งกึ่งกลางห้องนี้เป็นช่วงระยะที่เหมาะสมที่กล้องบนมัลติโรเตอร์สามารถจับภาพวัตถุได้ทั้งวัตถุโดยไม่หลุดออกจากกรอบ และไกลเพียงพอจากกำแพงและผู้ทำการทดลอง ซึ่งจะสามารถหยุดการบินได้ทันหากเกิดอุบัติเหตุ

สำหรับข้อกำหนดในการออกแบบ คือ ความคาดเคลื่อนของผลตอบสนองของการรักษาตำแหน่งอยู่ภายใต้ระยะ ± 1 เมตร ซึ่งช่วงความคลาดเคลื่อนนี้กำหนดจากระยะ 1 เมตรซึ่งเป็นระยะที่ใกล้ที่สุดที่กล้องบนมัลติโรเตอร์จะสามารถทำการจับภาพวัตถุได้ทั้งวัตถุโดยไม่หลุดออกจากกรอบ ซึ่งหากมัลติโรเตอร์สามารถทำการบินรักษาตำแหน่งโดยมีความคลาดเคลื่อน ± 1 เมตร ได้ทั้งที่ระยะห่าง 3 เมตร และ 4 เมตร มัลติโรเตอร์จะมีแนวโน้มที่จะสามารถทำการบินรักษาตำแหน่งโดยมีความคลาดเคลื่อน ± 1 เมตร ที่ระยะห่างอื่นๆด้วยเช่นกัน



Figure 1 The multirotor from left to right front view (A), side view (B) and top view (C)

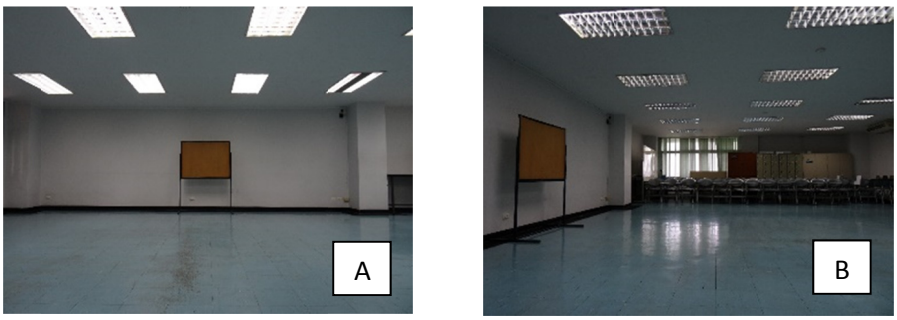


Figure 2 The fixed environment from left to right front view (A) and side view (B)

การออกแบบระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางและ ประมาณระยะห่าง

ศึกษาการใช้เซนเซอร์กล้องที่ติดตั้งกับอากาศยานสำหรับการส่งภาพ และวิดีโอออกมาประมวลผลในวงจรควบคุม โดยใช้วิธีการประมวลภาพ มาใช้ทำการระบุ และตรวจจับตำแหน่งศูนย์กลางของวัตถุ และคำนวณระยะห่างระหว่างอากาศยานและวัตถุ โดยการทดสอบความแม่นยำของการประมาณระยะห่างนั้นจะทำโดยบินอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ 8 จุดห่างจากกระดาน (Figure 3)

สำหรับขั้นตอนในการประมวลผลภาพและประมาณระยะห่างนั้นอธิบายได้ดังนี้

1. ทำการนำภาพจากกล้องเข้ามาเป็นภาพโทนเทา (grayscale) เนื่องจากว่าในการทดลองนี้จะพิจารณารูปทรงของวัตถุเป็นหลัก ดังนั้นการทำภาพเป็นโทนเทาจะช่วยเพิ่มความเร็วในการประมวลผล เพราะเป็นการตัดการประมวลผลเรื่องสีออกไป (Gonzalez *et al*., 2007)
2. ทำภาพไบนารี่ (binary image) และคำนวณหาขอบ (edge detection) ของวัตถุที่อยู่ในภาพ โดยคำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มของเม็ดสี (Gonzalez *et al*., 2007) ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการทดลองนี้เนื่องจากว่าวัตถุที่ใช้ในการทดลองนั้นมีสีเข้มกว่าตัวพื้นหลัง
3. วางขอบเขตจากเส้นขอบที่ได้มาให้อยู่ในรูปปิดหลายเหลี่ยม (polygon) โดยรูปปิดหลายเหลี่ยมนี้จะได้มาหลายรูป เนื่องจากวัตถุที่ใช้นั้นเป็นกระดานจึงมีทั้งขาตั้งที่ความเข้มสีแตกต่างจากตัวกระดาน อีกทั้งในรูปยังมีแผงหลอดไฟ จึงส่งผลให้เกิดรูปปิดหลายรูป
4. เนื่องจากทราบว่าตัวกระดานนั้นเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นจึงสามารถกรองรูปปิดอื่นที่ไม่สอดคล้องออกไปได้ และในการทดลองนี้วัตถุเป็นสิ่งที่มีขนาดใหญ่สุดในกรอบรูป จึงทำการหารูปปิดที่ถูกต้องด้วยการหาพื้นที่รูปปิดแต่ละอันที่เหลือ
5. เมื่อได้รูปปิดที่สอดคล้องกับวัตถุแล้ว จึงทำการหาพิกัดจุดศูนย์กลางของรูปปิดนั้น โดยคำนวณหาค่าเฉลี่ย (mean) (กัลยา, 2552) จากพิกัดมุมทั้งสี่ ซึ่งจุดกึ่งกลางนี้จะถูกใช้เป็นค่าที่วัดได้ในระบบควบคุมของแกน x
6. ทำการประมาณระยะห่างของภาพจากข้อเท็จจริงว่า
   - ขนาดภาพหรือขนาดของรูปปิด (I, pixel^2) แปรผันตามขนาดวัตถุ (O, mm^2) หรือ I α O
   - ขนาดภาพหรือขนาดของรูปปิด (I, pixel^2) แปรผกผันตามระยะห่าง (D, mm) หรือ I α 1/D

   ดังนั้น D = K•O/I โดยที่ K คือค่าคงที่ของเลนส์กล้อง (focal length)
   ซึ่งระยะทางนี้จะถูกใช้เป็นค่าที่วัดได้ในระบบควบคุมของแกน y

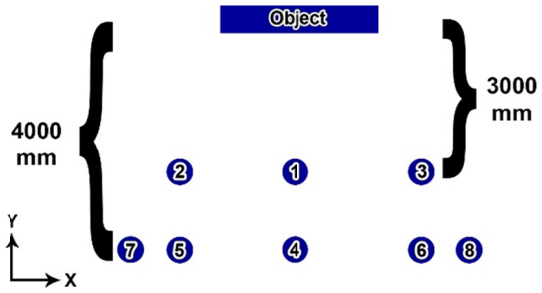


Figure 3 The position where the multirotor was operated in order to validate distance data (top view)

การจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์, หาสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันส่งผ่านของระบบ และจำลองผลตอบสนอง

การสร้างโมเดลของสัญญาณรบกวน และระบบควบคุมแบบวงปิด (closed-loop control system) ของระบบรักษาตำแหน่งและจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม Matlab Simulink (Figure 4A)

ในการจำลองผลตอบสนองของระบบนั้น จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) (Kuo *et al*., 2009) ในการหานั้นจะใช้เครื่องมือ System Identification Toolbox โดยมีหลักการว่าต้องทราบค่าที่ใส่ให้ระบบ (input) ซึ่งคือระยะ 3 เมตร และ 4 เมตรในการทดลองนี้ และผลตอบสนอง (output) ซึ่งก็คือพฤติกรรม

ของมัลติโรเตอร์ที่ได้ทดสอบบินโดยชุดควบคุมพี (P-Control) จากนั้นจึงทำการกำหนดรูปแบบสมการของฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งในที่นี้ระบบจะอยู่ในรูปสมการกำลังสอง (G. Justin, 2012) และเมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบมาจึงทำการจำลอง (simulation) โดยวาดแผนภาพแบบกล่อง (block-diagram) (figure 4B) และปรับชุดควบคุมพีดี (PD controller) จนระบบได้ผลตอบสนองที่ต้องการแล้วนำไปประยุกต์ใช้กับมัลติโรเตอร์ที่ประกอบไว้ต่อไป

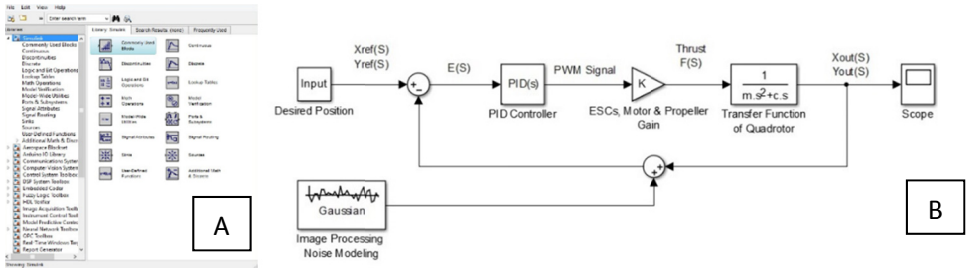


Figure 4 Closed-loop simulation from left to right Simulink toolbox (A) and closed-loop system (B)

การประยุกต์ใช้ระบบรักษาตำแหน่งกับอากาศยาน และออกแบบระบบหลบหลีกการชน

ในการปรับใช้ผลการจำลอง นั้นจะทำการแปลงตัวควบคุมพีไอดีที่อยู่ในโดเมนเวลาแบบต่อเนื่อง (continuous time domain) หรือ s-domain ไปสู่โดเมนเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete time domain) หรือ z-domain เนื่องจากบอร์ดควบคุม (microcontroller) นั้นเป็นอุปกรณ์ดิจิตอล จึงเหมาะสมกับสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องมากกว่า (Kuo *et al.*, 2009) จากนั้นจึงทำการบินทดสอบที่ระยะ 3 เมตร และ 4 เมตรห่างจากวัตถุบันทึกผลตอบสนอง และเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการจำลอง นอกจากนี้จัดทำในส่วนของระบบหลบหลีกการชน ซึ่งเป็นระบบที่เพิ่มเติมต่อจากระบบรักษาตำแหน่งอีกที โดยมีเงื่อนไขการทำงานตามแผนภาพ (Figure 5)

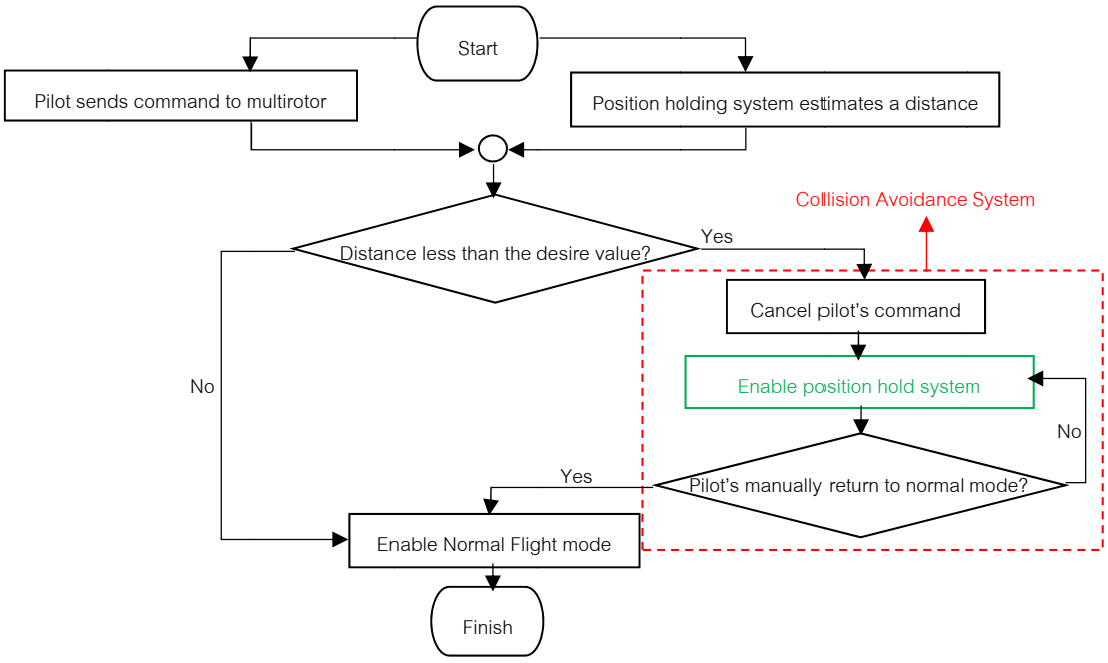


Figure 5 Flow chart of how the collision avoidance system would be enacted

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการออกแบบระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางและ ประมาณระยะห่าง

จากการใช้วิธีการประมวลผลภาพมาออกแบบระบบตรวจจับวัตถุ พบว่าอากาศยานสามารถตรวจจับวัตถุที่ต้องการได้ (Figure 6) จากนั้นนำข้อมูลที่ตรวจจับได้มาประมาณหาระยะห่าง และคำนวณหาค่าความคาดเคลื่อน (Figure 7, Table 1) พบว่ายิ่งอากาศยานเลื่อนที่ออกไปทางซ้าย หรือทางขวามากเท่าไหร่ ค่าความคลาดเคลื่อนก็จะยิ่งมากขึ้นเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามจากข้อมูลกราฟ และการทดสอบสมมติฐาน (hypothesis testing) โดยวิธี z-test (กัลยา, 2552) พบว่าผลตอบสนองเมื่อเลื่อนที่ไปซ้ายและขวาที่ระยะห่างต่างๆมีค่าไม่ต่างกัน

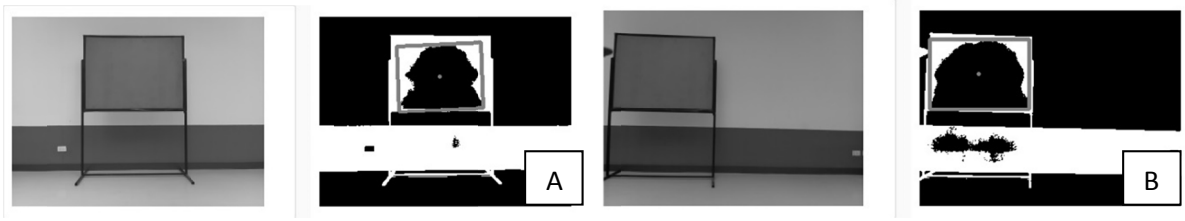


Figure 6 Some results of obstacle detection system from left to right position 1 (A) and position 3 (B)

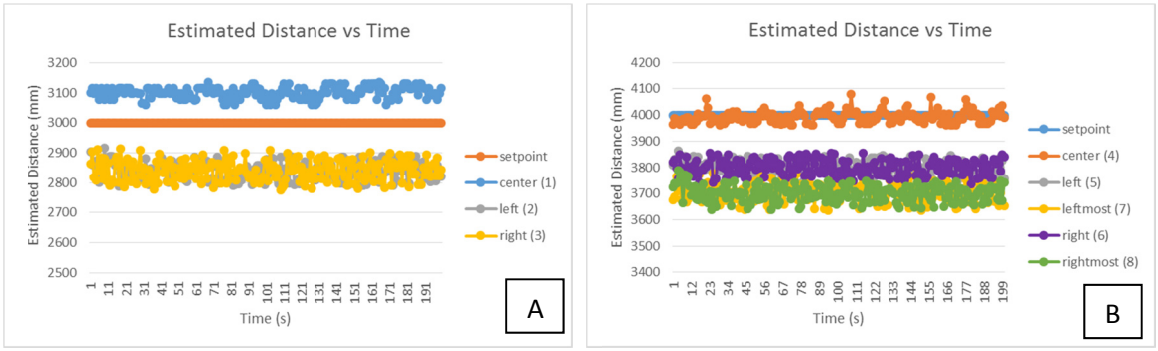


Figure 7 Graph of Estimated Distance vs Time from left to right at 3 meters (A) and at 4 meters (B)

Table 1 Error between average of estimated distance and actual distance of each position

Position	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Actual distance	3000			4000				
Average distance	3100.4	2838.9	2840.4	3992.5	3798.8	3799.9	3705.4	3699.7
% Error	+3.35	-5.37	-5.32	-0.188	-5.03	-5.00	-7.37	-7.51

ผลการจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์ และผลการจำลองของผลการตอบสนองของระบบรักษาตำแหน่ง

จากการใช้เครื่องมือ System Identification ทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของอากาศยาน ซึ่งได้แก่ m, k_x, c_x, k_y, และ c_y มีค่าเท่ากับ 0.7578, 0.057, 0.0411, 20.374, และ 2.434 ตามลำดับ และจากผลการจำลองจากเครื่องมือ Simulink พบว่าระบบรักษาตำแหน่งแบบตัวควบคุมพีดี (PD-Control) ซึ่งมี

ค่าคงที่ของการควบคุม (gain) ซึ่งได้แก่ Kp_x, Kd_x, Kp_y, และ Kd_y มีค่าเท่ากับ 2.393, 7.246, 0.6695 และ 0.1037 ตามลำดับ ให้ผลตอบสนองโดยรวมที่มีแอมพลิจูดน้อยกว่าตัวควบคุมแบบพี (P-control) (Figure 8)

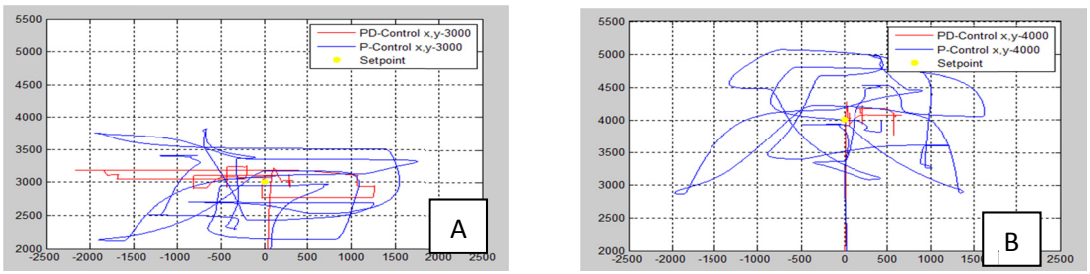


Figure 8 The respond simulation of position holding system from left to right at 3 m (A) and at 4 m (B)

ผลการปรับใช้ระบบรักษาตำแหน่งกับอากาศยาน และผลการออกแบบระบบหลบหลีกการชน

จากการแปลงโดเมนของฟังก์ชันเวลาต่อเนื่องให้มาอยู่ในรูปฟังก์ชันเวลาไม่ต่อเนื่องจะได้ตัวควบคุมแบบพีดีในรูป $PD_x(z) = 31.42+29.02z^{-1}$ และ $PD_y(z) = 1.084+0.4148z^{-1}$ สำหรับแกน x และแกน y ตามลำดับ และเมื่อทำการบินเก็บข้อมูล พบว่าแม้ผลการจำลอง (simulation) จะมีบางส่วนที่แอมพลิจูดสูงเกิน ±1 เมตร แต่ผลการตอบสนองจริง (respond) เมื่อปรับใช้ชุดควบคุมที่จำลองไว้นั้นมีแอมพลิจูดอยู่ในขอบเขตของการออกแบบ ±1 เมตร ที่ได้กำหนดไว้ (Figure 9) นอกจากนี้เพื่อดูผลการพัฒนาของระบบจึงทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองจริง (respond) ระหว่างระบบที่ใช้ชุดควบคุมพี และระบบที่ใช้ชุดควบคุมพีดี (Figure 10) จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมพีดีนั้นมัลติโรเตอร์จะมีแอมพลิจูดที่น้อยกว่าระบบควบคุมพี ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองใน Figure 8

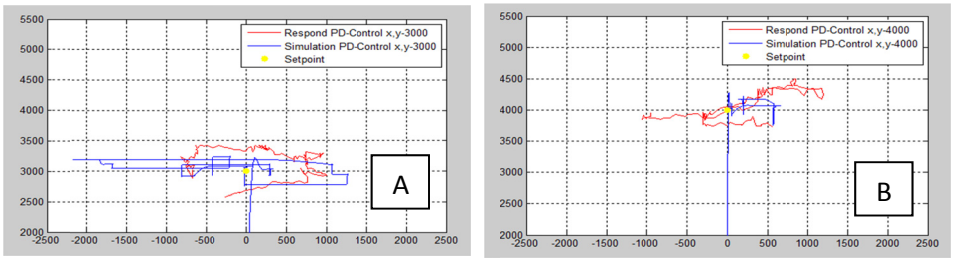


Figure 9 The simulation and actual respond from left to right at 3 meters (A) and at 4 meters (B)

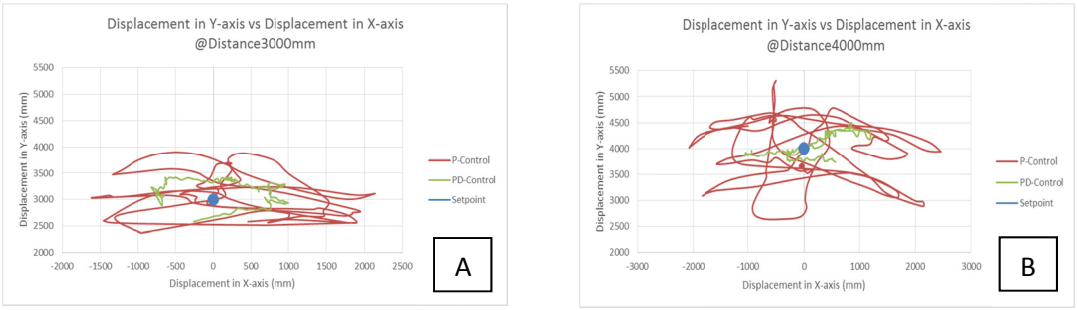


Figure 10 The actual respond from left to right at 3 meters (A) and at 4 meters (B)

สำหรับในส่วนของผลตอบสนองของระบบหลบหลีกการชนนั้นอากาศยานสามารถทำการยกเลิกคำสั่งจากนักบินได้ทันทีที่อากาศยานเคลื่อนที่เข้าใกล้วัตถุ โดยมีระยะห่างน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ (3 เมตร) และทำการหยุดการเคลื่อนที่ของอากาศยานเองทันที จากนั้นจะหยุดรอต่อไปจนกว่าจะมีคำสั่งใหม่จากนักบินว่าพร้อมที่จะเปลี่ยนไปทำการบินแบบปกติ (Figure 11)

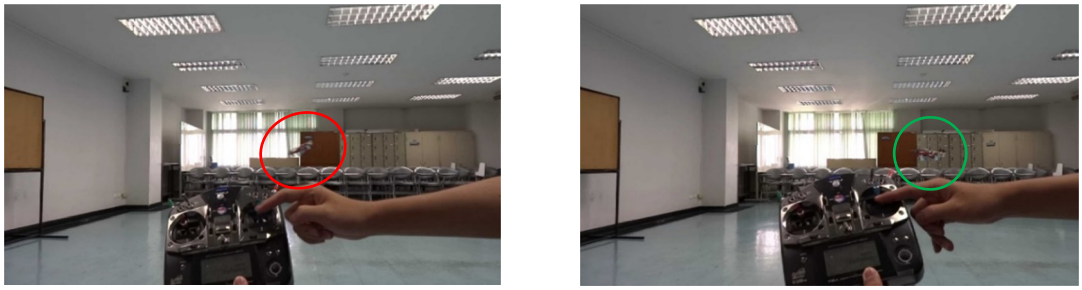


Figure 11 the collision avoidance system from the left to right disable (A) enable (B)

สรุป

ระบบรักษาตำแหน่งและหลบหลีกการชนสามารถพัฒนาขึ้นมาจากวิธีการประมวลผลภาพ และการประยุกต์ใช้ชุดควบคุม โดยเริ่มจากตรวจจับวัตถุ, หาจุดศูนย์กลางวัตถุ และประมาณระยะห่างระหว่างวัตถุและอากาศยาน พบว่าอากาศยานสามารถกลับเข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการได้ด้วยชุดควบคุมพี แต่มีแอมพลิจูดสูงเกินกว่าขอบเขตที่กำหนดไว้ และเมื่อทำการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบพีดี ซึ่งออกแบบมาจากฟังก์ชันถ่ายโอน และการจำลองผลตอบสนอง พบว่าอากาศยานยังคงสามารถกลับเข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการได้ และมีแอมพลิจูดที่ลดลง สำหรับระบบหลบหลีกการชน พบว่าเมื่ออากาศยานเคลื่อนที่เข้าใกล้วัตถุมากกว่าระยะที่กำหนดไว้ อากาศยานจะเข้าสู่ระบบรักษาตำแหน่งเองอย่างอัตโนมัติ โดยสามารถยกเลิกคำสั่งจากรีโมท และหยุดการเคลื่อนที่เองได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ หน่วยวิจัย ISAAC Lab ศูนย์วิจัยและพัฒนาอากาศยานไร้คน ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และนายณัฐวุฒิ เอื้อศักดิ์สุภา นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2552. **หลักสถิติ**. พิมพ์ครั้งที่ 11. บริษัทธรรมสาร จำกัด, กรุงเทพฯ.

D. John, E. Miguel, G. Mathew, L. James, Q. Jordan, R. Bills. 2015. **Obstacle Avoidance System for UAVs Using Computer Vision.** M.S. Thesis, California State Polytechnic University.

Gonzalez, R.C., R.E. Woods. 2007. **Digital Image Processing**. 3rd. Pearson Education Inc., New York.

G. Justin. 2012. **Intelligent Data Acquisition and Processing for Unmanned Aerial Vehicles**. M.S. Thesis, Texas Tech University.

Kuo, B.C., F.Golnaraghi. 2009. **Automatic Control Systems**. 9th. John Wiley & Sons Inc., New York.

การศึกษาพฤติกรรมสัญญาณทรานเซี้ยนต์จากชุดทดสอบสัญญาณทรานเซี้ยนต์ในระบบคาปาซิเตอร์แบงค์

Transient behavior study from transient test set in capacitor bank system

อรรถพล เง่าพิทักษ์กุล[1*], สันติพนธ์ อนันต์วัฒนาพร[1], ชายชาญ โพธิสาร[1], สัณฐิติ อยู่มาก[1] และ ธีระศักดิ์ พัฒน์เจริญ[2]

Atthapol Ngaopitakkul[1*], Santipont Ananwattanaporn[1], Chaichan Pothisarn[1], Suntiti yoomak[1] and Teerasak Patcharoen[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในขณะสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานในแต่ละสเต็ป โดยมีการสร้างชุดสาธิตระบบสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ จำลองระบบจริงมาจากสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก เพื่อเก็บข้อมูลและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในขณะที่สวิตชิ่งคาปาซิเตอร์เข้าใช้งาน โดยศึกษาสัญญาณชั่วขณะที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น กระแสอินรัช แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะและการแกว่งของความถี่ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ทั้งหมด 2 กรณี ในกรณีที่ 1 ศึกษาการสวิตชิ่งเมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์อย่างเดียว และกรณีที่ 2 ศึกษาการสวิตชิ่งเมื่อมีตัวเหนี่ยวนำค่าต่างๆติดตั้งอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ จากนั้นนำผลการศึกษาทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบป้องกันคาปาซิเตอร์และอุปกรณ์ประกอบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ABSTRACT

This research presents a study on transient signal that occurs when switching capacitor in each step. An experimental test bench of capacitor bank switching is built by downscaling Nong Chok substation. The practical test set aims to collect data and to study transient signal, in capacitor bank switching, that has impact on the power system such as inrush current, voltage transient and frequency oscillating. The research for switching capacitor bank system focuses on two cases: the first is the case of pure capacitor and the second is the case of capacitor connected with series inductance, in order to compare the results and phenomena occurred. The obtained results could be finally beneficial in transient signal analysis and protection equipment design for capacitor bank system.

Key Words: Capacitor bank, Inrush current, Voltage

* Corresponding author; e-mail address: knatthap@kmitl.ac.th

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คำนำ

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน ได้มีการติดตั้งระบบคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าไปที่สถานีไฟฟ้าย่อยเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยคาปาซิเตอร์หรือตัวเก็บประจุไฟฟ้านั้นจะมีหน้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบ ในกรณีที่มีโหลดอินดักแตนซ์จำนวนมากผลจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ระดับแรงสูงที่สถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะเป็นการช่วยรักษาเสถียรภาพทางไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันที่ลดลงในช่วงโหลดสูงสุด อีกทั้งยังสามารถลดกำลังสูญเสีย และช่วยเพิ่มความสามารถในการส่งกำลังของระบบ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดการลงทุนในการก่อสร้างระบบส่ง หรือสถานีไฟฟ้าย่อย (Govind Gopakumar; Shehab Abdulwadood Ali, 2011; SurawutT., 1999; M. Gerin., 2004; Tanuj Manglani, 2012)

ในการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานในระบบ จะก่อให้เกิดปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้าหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึง ในส่วนแรกคือ แรงดันเกินชั่วขณะ (Overvoltage transient) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของคาปาซิเตอร์ที่มีการสวิตชิ่งและคาปาซิเตอร์ตัวอื่นๆ เนื่องมาจากปรากฏการณ์ขยายตัวของแรงดัน (Voltage Magnification) ส่วนที่สองคือกระแสชั่วขณะ (Current transient) โดยหลักจะเป็นกระแสอินรัช (Inrush Current) ที่มีขนาดและความถี่สูงส่วนสุดท้ายคือฮาร์โมนิค เนื่องจากการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์นั้นจะมีโอกาสที่จะไปขยายขนาดและความถี่ของสัญญาณฮาร์โมนิคที่มีอยู่เดิมให้มีค่าสูงขึ้นได้ (Govind Gopakumar; Shehab Abdulwadood Ali, 2011), (Durga Bhavan iMupparty, 2011; A. Kalyuzhny; E. h. Camm, 1999; Thomas M; IEEE Std 1036)

ปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้าเหล่านี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวคาปาซิเตอร์ อุปกรณ์ควบคุมต่างๆในสถานีไฟฟ้าย่อย หรือรวมถึงระบบไฟฟ้ากำลังในภาพรวมซึ่งจะมีผลกระทบเป็นอย่างยิ่งต่อความน่าเชื่อถือของระบบ ขณะที่ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อผู้บริโภคคือ โหลดที่มีความอ่อนไหวสูงจะมีปัญหาหรืออาจถึงขั้นเกิดความเสียหายขึ้น (Govind Gopakumar; Anna Baby, 2013; Myeong-Hee Lee, 2013; Working Group, 1996) สำหรับในระบบสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์นั้นจะมีวิธีการที่จะป้องกันปัญหาที่เกิดจากสัญญาณชั่วขณะได้แก่การใช้ตัวต้านทานขนานสวิตช์(Pre-insert resistor) เป็นการนำตัวต้านทานมาต่อกับสวิตช์ที่วางขนานกับวงจรก่อนเข้า

จากที่กล่าวมาข้างต้นการศึกษาในการวิจัยที่ผ่านมาจะเป็นการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ในโครงงานวิจัยนี้จะเป็นการจำลองระบบสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ในสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ลงมาอยู่ในชุดทดลองที่ระดับแรงดัน 415V โดยจะเป็นการออกแบบและสร้างทั้งในส่วนวงจรกำลังและวงจรควบคุม ในการศึกษานั้นจะเป็นการวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นในขณะสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์เข้าใช้งานในแต่ละสเต็ป ทั้งในกรณีก่อนและหลังการใช้เทคนิคป้องกัน แล้วจะมีการเปรียบเทียบผลการศึกษาจากทั้งสองกรณี เพื่อที่จะเป็นข้อมูลในการประยุกต์การป้องกันที่เหมาะสม และสามารถนำไปพัฒนาระบบการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การสวิตชิ่งของคาปาซิเตอร์แบงค์

ปัญหาอย่างหนึ่งของระบบคาปาซิเตอร์แบงค์ คือ เมื่อต้องการใช้งานจะต้องมีการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบ การสวิตชิ่งนี้จะทำให้เกิดสัญญาณชั่วขณะขึ้นในระบบได้แก่ กระแสอินรัช แรงดันทรานเซียนต์ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อตัวคาปาซิเตอร์แบงค์และระบบที่ต่อร่วมด้วย

1. การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบงค์เดี่ยว

เมื่อสวิตช์ถูกปิดลงกระแสที่มีขนาดและความถี่สูงจะไหลเข้าสู่ตัวคาปาซิเตอร์ เพื่อที่จะทำให้แรงดันที่คาปาซิเตอร์เท่ากับแรงดันของระบบ ถ้าสวิตช์ถูกปิดที่แรงดันยอด แรงดันภายในคาปาซิเตอร์จะพยายามที่เพิ่มจากระดับศูนย์ในสภาวะที่ยังไม่ถูกกระตุ้นไปยังแรงดันยอดอย่างทันทีทันใด ในกระบวนการที่จะทำให้ได้แรงดันในระดับนี้การพุ่งเกิน (Overshoot) จะเกิดขึ้นซึ่งจะมีขนาดเป็นเท่าตัวของแรงดันยอด แรงดันเซิร์จ (Voltage Surge) นี้จะมีความสูงเทียบเท่ากับกระแสอินรัช

2. การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบงค์แบบแบ็ค-ทู-แบ็ค

การกระตุ้นคาปาซิเตอร์แบงค์ในขณะที่บริเวณใกล้เคียงมีคาปาซิเตอร์แบงค์ที่ถูกกระตุ้นเชื่อมต่ออยู่ก่อนแล้ว ในการสวิตชิ่งลักษณะนี้นั้นจะทำให้เกิดสัญญาณชั่วขณะความถี่สูงเนื่องจากผลรวมของค่าคาปาซิแตนซ์จากคาปาซิเตอร์ตัวก่อนหน้าที่เชื่อมกับระบบกรณีที่เลวร้ายที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตชิ่งที่จุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุดของรูปสัญญาณแรงดัน ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันชั่วขณะบนบัสที่ขนาดและความถี่สูงมาก

การออกแบบชุดสาธิตคาปาซิเตอร์แบงค์

ในการวิจัยนี้ จะเป็นการสร้างชุดสาธิตระบบสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ โดยจะมีการจำลองจากระบบสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ ในสถานีไฟฟ้าย่อยหนอกจอก ที่ระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ ภายในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยโดยจะจำลองลงมาอยู่ที่ระดับแรงดัน 415 โวลต์ ซึ่งสถานีไฟฟ้าย่อยที่เลือกจะมีอุปกรณ์คาปาซิเตอร์แบงค์จำนวน 3 สเต็ป มีขนาด 48 เมกกะโวลต์แอมแปร์รีแอคทีฟ โดยคาปาซิเตอร์แบงค์นั้นจะเป็นอุปกรณ์ช่วยยกระดับแรงดันที่จะไปยังโหลดของการไฟฟ้านครหลวง

ค่าพารามิเตอร์ระบบเพอร์ยูนิต

สถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอกมีข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณระบบเพอร์ยูนิตดังนี้ฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA Base) มีค่าเท่ากับ 200 เมกะโวลต์แอมแปร์ ฐานแรงดัน (V Base) มีค่าเท่ากับ115 กิโลโวลต์ สำหรับค่าฐานอิมพีแดนซ์ (Z Base) มีค่าเท่ากับ 66.125 โอห์ม ค่ากำลังรีแอคทีฟของสถานีไฟฟ้าย่อยหนอกจอกจะหาได้จากขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่ที่บัส ซึ่งมีขนาด 48 เมกกะโวลต์แอมแปร์รีแอคทีฟ ดังนั้นเมื่อแปลงเป็นระบบเพอร์ยูนิตจะมีค่ากำลังรีแอคทีฟจะมีค่าเท่ากับ 0.24 เพอร์ยูนิต

สำหรับห้องปฏิบัติการนั้นข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณระบบเพอร์ยูนิตจะมีดังนี้ ฐานแรงดัน (V Base) มีค่าเท่ากับ 415 โวลต์ และฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA Base) โดยค่ากระแสนั้นจะใช้ค่าพิกัดของเซอร์กิตเบรกเกอร์หลักของห้องปฏิบัติการซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 30 แอมป์ เพราะฉะนั้นฐานกำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA Base) จากการคำนวณจะมีค่าเท่ากับ 21.56 เมกะโวลต์แอมแปร์ สำหรับขนาดของคาปาซิเตอร์ที่จะใช้ในชุดสาธิตนั้นจะคำนวณได้จากกำลังรีแอคทีฟของสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก โดยนำค่าเพอร์ยูนิตมาคูณกับฐานกำลังไฟฟ้า

ปรากฏของห้องปฏิบัติการ ผลการคำนวณจะมีค่าเท่ากับ 5.17 กิโลโวลต์แอมแปร์รีแอคทีฟ แต่ตามมาตรฐานการผลิตคาปาซิเตอร์นั้นจะไม่เหมาะสมที่จะผลิตค่าดังกล่าว ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดคาปาซิเตอร์ตามมาตรฐานคือขนาด 5 กิโลโวลต์แอมแปร์รีแอคทีฟ ที่ระดับแรงดัน 415 โวลต์

วงจรของชุดสาธิต

การทำงานของชุดสาธิตระบบสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ในโครงงานวิจัยนี้ จะทำงานโดยการรับแรงดันจากห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าเท่ากับ 380 โวลต์ จากนั้นส่งผ่านไปยังหม้อแปลงปรับค่าได้ (Variable Voltage Transformer) โดยจะยกระดับแรงดันเป็น 415 โวลต์ เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับชุดสาธิต โดยตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor Controller) จะทำหน้าที่วัดแรงดันและกระแสในชุดสาธิต จากนั้นจึงส่งสัญญาณควบคุมให้หน้าสัมผัส (Contactor) สั่งสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าทำงาน โดยจะมีการแบ่งวงจรออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ วงจรกำลังและวงจรควบคุม

1. วงจรกำลัง

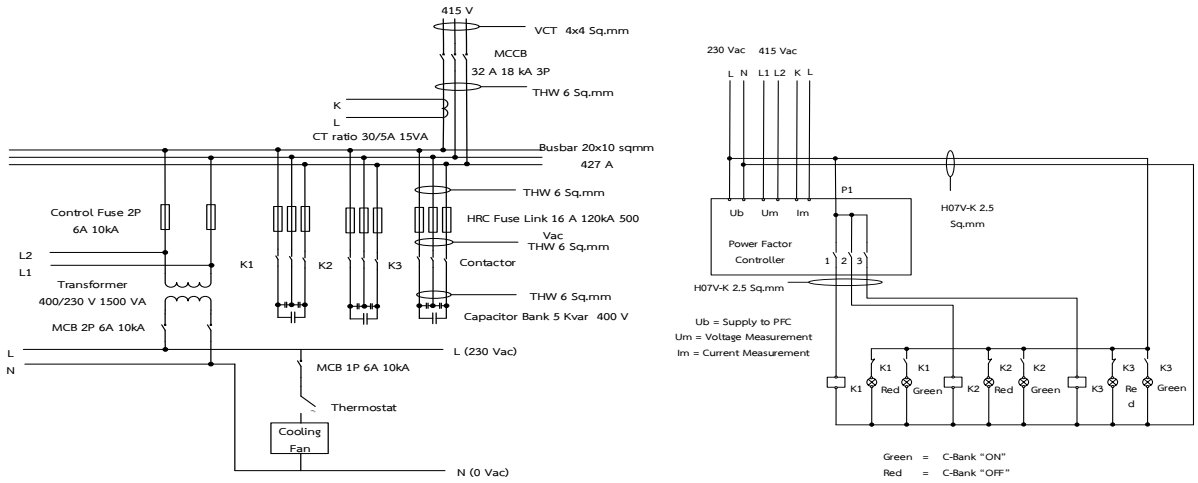
วงจรกำลังของชุดสาธิตนั้นจะมีหน้าที่จ่ายไฟจากระบบของห้องปฏิบัติการเพื่อให้ชุดสาธิตสามารถทำงานได้ โดยตัววงจรนั้นได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนที่รับไฟที่ระดับแรงดัน 415 โวลต์ จากห้องปฏิบัติการผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ของทั้งตัวห้องปฏิบัติการและของชุดสาธิต เพื่อจ่ายไฟให้กับคาปาซิเตอร์เมื่อคอนแทคเตอร์ทำงาน โดยจะมีฟิวส์ใบมีดเป็นอุปกรณ์ป้องกันตัวคาปาซิเตอร์ และส่วนที่สองคือส่วนที่รับไฟมาแล้วผ่านหม้อแปลง 415/230 โวลต์ เพื่อลดระดับแรงดันสำหรับจ่ายไฟให้อุปกรณ์ประกอบในตู้ สำหรับด้านปฐมภูมินั้นจะมีฟิวส์เป็นอุปกรณ์ป้องกัน และมีจุดเชื่อมต่อกับฟังก์ชันวัดแรงดันของตัวควบคุมตัวประกอบกำลัง สำหรับด้านทุติยภูมินั้นจะมีการจ่ายไฟให้พัดลมระบายอากาศ ซึ่งจะมีการติดตั้งสวิตช์อุณหภูมิเพื่อให้พัดลมระบายอากาศทำงานตามอุณภูมิที่กำหนดไว้ และอีกส่วนจะเป็นไฟเลี้ยงสำหรับตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยจะมีการนำหม้อแปลงกระแสมาเชื่อมต่อที่หลังเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่เฟส A เพื่อวัดปริมาณ แบบของวงจรกำลังจะเป็นดังที่แสดงในวงจร Figure 1(a)

2. วงจรควบคุม

สำหรับวงจรควบคุมภายในชุดสาธิตนั้นจะทำหน้าที่ควบคุมการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบ โดยใช้ตัวควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สั่งงานให้แมคเนติกคอนแทคเตอร์ทำการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าไปในระบบตามค่าตัวประกอบกำลังที่ตั้งค่าไว้ โดยตัววงจรจะมีไฟบอกสถานะการทำงานของคาปาซิเตอร์ในแต่ละสเต็ป ไฟสีแดงหมายถึงคาปาซิเตอร์ยังไม่ได้ต่อเข้าสู่ระบบ และไฟสีเขียวหมายถึงคาปาซิเตอร์ได้ถูกต่อเข้าสู่ระบบแล้ว แบบของวงจรควบคุมจะเป็นดังที่แสดงใน Figure 1(b)

ในการทดลองจะทำการทดลองโดยจำลองชุดสาธิตระบบการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์โดยคาปาซิเตอร์ที่ใช้จะมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเสมือนขนาด 55 กิโลโวลต์แอมแปร์รีแอคทีฟ จำนวนสามสเต็ป คือสเต็ปที่ 1 จะเป็นการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์หนึ่งตัวเข้าระบบ ในสเต็ปที่ 2 และในสเต็ปที่ 3 จะทำการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เพิ่มอีกหนึ่งตัวเข้าระบบ ในระดับแรงดันไฟฟ้า 415 โวลต์ โดยได้แบ่งการจำลองออกเป็น 5 แบบดังนี้ คือ วงจรการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์โดยไม่มีการต่อตัวเหนี่วนำ วงจรการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 6 8 และ 10 ไมโครเฮนรี ต่ออนุกรม

ในการศึกษาพฤติกรรมของแรงดันชั่วขณะ และกระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเมื่อมีการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบในแต่ละสเต็ปโดยให้ตัวคาปาซิเตอร์แบงค์เป็นโหลดของระบบ การเก็บข้อมูลจะทำ โดยการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อมีการสวิตชิ่งในแต่ละสเต็ป เพื่อจะนำข้อมูลมาวิเคราะห์พฤติกรรมของสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้น



(a) Single line diagram of experimental setup (b) Control diagram of Experimental test unit

Figure 1 Single line diagram of capacitor bank experimental

ผลและวิจารณ์

วงจรการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์โดยไม่มีการต่อตัวเหนี่วนำ

Table 1 Voltage and current data in case of without inductor

DATA	Voltage (V)			Current (A)		Phase Angle
	Phase A	Phase B	Phase C	RMS	Inrush	
Before Switching	228.88	232.14	231.92	0.3	-	-
Step 1	229.64	232.42	232.20	6.9	120.2	270
Step 2	229.92	232.66	232.42	13.9	163.7	90
Step 3	229.94	232.72	232.44	13.9	185.6	90

จากข้อมูลผลการทดลองใน **Table 1** แสดงการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ใช้งานทั้งหมดสามสเต็ปสำหรับในกรณีไม่มีการต่อตัวเหนี่ยวนำ เมื่อสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์สเต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบกระแสอินรัชที่จับได้จะมีค่า 120.2 แอมป์ สเต็ปที่สองจะมีค่า 163.7 แอมป์ และสเต็ปที่สามจะมีค่า 185.6 แอมป์ ซึ่งจะเป็นไปตามแนวโน้มทางทฤษฎีคือ กระแสจะมีค่าสูงขึ้นในสเต็ปต่อมาเนื่องจากกระแสที่อยู่ในคาปาซิเตอร์สเต็ปก่อนหน้าโดยเปรียบเทียบจากกระแสในการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์สเต็ปที่หนึ่งเทียบกับสเต็ปที่สองและสเต็ปที่สาม

วงจรการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 ไมโครเฮนรี ต่ออนุกรม

Table 2 Voltage and current data in case of with 4uH inductor

DATA	Voltage (V)			Current (A)		Phase Angle
	Phase A	Phase B	Phase C	RMS	Inrush	
Before Switching	239.74	242.36	241.62	0.2	-	-
Step 1	240.16	242.76	242.10	7.2	81.6	270
Step 2	240.64	243.22	242.50	14.6	97.7	90
Step 3	240.94	243.58	242.82	14.6	179.5	270

จากข้อมูลผลการทดลองใน **Table 2** แสดงการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ใช้งานทั้งหมดสามสเต็ปสำหรับในกรณีมีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 ไมโครเฮนรี ต่ออนุกรมอยู่ เมื่อสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์สเต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบกระแสอินรัชที่จับได้จะมีค่า 81.6 แอมป์ สเต็ปที่สองจะมีค่า 97.7 แอมป์ และสเต็ปที่สามจะมีค่า 179.5 แอมป์ จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการต่อตัวเหนี่ยวนำอนุกรมเข้าในระบบ สามารถช่วยลดค่ากระแสอินรัชในแต่ละสเต็ปได้

วงจรการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 6 ไมโครเฮนรี ต่ออนุกรม

Table 3 Voltage and current data in case of with 6uH inductor

DATA	Voltage (V)			Current (A)		Phase Angle
	Phase A	Phase B	Phase C	RMS	Inrush	
Before Switching	241.16	244.08	242.92	0.4	-	-
Step 1	241.64	244.54	243.42	7.1	81.4	45
Step 2	242.24	244.96	243.84	14.6	124.7	270
Step 3	242.64	245.36	244.20	14.7	149.3	90

จากข้อมูลผลการทดลองใน **Table 3** แสดงการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ใช้งานทั้งหมดสามสเต็ปสำหรับในกรณีมีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 6 ไมโครเฮนรี ต่ออนุกรมอยู่ เมื่อสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์สเต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบกระแสอินรัชที่จับได้จะมีค่า 81.4 แอมป์ สเต็ปที่สองจะมีค่า 124.7 แอมป์ และสเต็ปที่สามจะมีค่า 149.3 แอมป์ สังเกตได้ว่าค่ากระแสในสเต็ปที่ 1 และ 3 มีค่าน้อยลงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากกรณีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 4 ไมโครเฮนรี แต่ในสเต็ปที่ 2 กระแสกลับมีค่าสูงขึ้น เนื่องมาจากผลของมุมที่ทำการสวิตชิ่ง

วงจรการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 ไมโครเฮนรี ต่ออนุกรม

Table 4 Voltage and current data in case of with 8uH inductor

DATA	Voltage (V)			Current (A)		Phase Angle
	Phase A	Phase B	Phase C	RMS	Inrush	
Before Switching	237.34	241.84	239.90	0.4	-	-
Step 1	237.74	242.22	240.24	7.2	78.6	270
Step 2	238.30	242.74	240.74	24.5	133.3	270
Step 3	238.64	242.96	240.98	14.5	149.3	90

จากข้อมูลผลการทดลองใน Table 4 แสดงการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ใช้งานทั้งหมดสามสเต็ปสำหรับในกรณีมีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 ไมโครเฮนรี ต่ออนุกรมอยู่ เมื่อสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์สเต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบ กระแสอินรัชที่จับได้จะมีค่า 78.6 แอมป์ สเต็ปที่สองจะมีค่า 133.3 แอมป์ และสเต็ปที่สามจะมีค่า 149.3 แอมป์ สังเกตได้ว่าค่าของกระแสมีค่าลดลงแต่ไม่มากเนื่องจากผลของมุมสวิตชิ่ง

วงจรการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เมื่อมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 ไมโครเฮนรี ต่ออนุกรม

Table 5 Voltage and current data in case of with 10uH inductor

DATA	Voltage (V)			Current (A)		Phase Angle
	Phase A	Phase B	Phase C	RMS	Inrush	
Before Switching	236.5	240.94	239.24	0.2	-	-
Step 1	236.92	241.26	239.66	7.1	66.0	270
Step 2	237.22	241.62	239.84	14.4	123.8	0
Step 3	237.64	241.96	240.20	14.4	135.0	180

จากข้อมูลผลการทดลองใน Table 5 แสดงการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์ใช้งานทั้งหมดสามสเต็ปสำหรับในกรณีมีการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 10 ไมโครเฮนรี ต่ออนุกรมอยู่ เมื่อสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์สเต็ปที่หนึ่งเข้าสู่ระบบ กระแสอินรัชที่จับได้จะมีค่า 66 แอมป์ สเต็ปที่สองจะมีค่า 123.8 แอมป์ และสเต็ปที่สามจะมีค่า 135 แอมป์ พบว่าค่ากระแสมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ต่อตัวเหนี่ยวนำและการต่อตัวเหนี่ยวนำขนาด 4, 6 และ 8 ไมโครเฮนรี

สรุป

จากการศึกษาผลที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าใช้งานนั้น ลักษณะของสัญญาณแรงดันและกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน โดยลักษณะของสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดและความถี่ที่สูงมากภายในระยะเวลาสั้นๆ และเมื่อมีการติดตั้งตัวเหนี่ยวนำเพิ่มเข้าไป ขนาดของกระแสอินรัชในขณะสวิตชิ่งนั้นจะมีขนาดลดลง เนื่องมาจากค่ารีแอคแตนซ์จากตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์แบงค์

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่ากระแสอินรัชที่เกิดขึ้นเมื่อการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบนั้นจะมีค่าสูงมากเป็นหลายเท่าของกระแสพิกัด ส่วนการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์สเต็ปถัดมาเมื่อมีคาปาซิเตอร์แบงค์สเต็ปก่อนหน้านั้นเชื่อมต่ออยู่แล้วนั้นจะทำให้ค่ากระแสอินรัชของการสวิตชิ่งสเต็ปถัดมามีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิม และเมื่อมีการติดตั้งตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับคาปาซิเตอร์แบงค์นั้นสามารถลดขนาดของกระแสอินรัชลงได้อย่างมีนัยสำคัญแต่จะมีบางกรณีที่ยังมีกระแสสูงอยู่ เนื่องมาจากผลของมุมสวิตชิ่ง สำหรับข้อมูลของแรงดันจากผลการทดลองพบว่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบงค์เข้าสู่ระบบ ซึ่งข้อมูลที่วัดได้จากชุดสาธิตจริงก็เป็นไปตามทฤษฎี ที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดย ทุนวิจัยแผนเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน ปี 2556

เอกสารอ้างอิง

Govind Gopakumar, Huihua Yan, Dr. Bruce A. Mork “Shunt Capacitor Bank Switching Transients A Tutorial Aand Case Study”Michigan Technological University.

Shehab Abdulwadood Ali “Capacitor Banks Switching Transients in Power System” Energy Science and Technology Vol.2, No.2, Page 62-73, 2011

SurawutT., Surapong T., Seksak C., Dr. Jongrak Boonseang “Transient Capacitor Switching for H.V. Substation due to Voltage Magnification” King Mongkut's Institute of Technology LadkrabangBachelor's Theses1999

M. Gerin. “Improving the power factor of an electrical installation” Available: http://www.engineering.schneiderelectric.se/Attachments/ed/guide/my_partner_b61_improving_electrical_installation_power_factor.pdf, 2004

Tanuj Manglani, Y. S. Shishodia “A Survey of Optimal Capacitor Placement Techniques on Distribution Lines to Reduce Losses” International Journal of Recent Research and Review, Vol. 1, March 2012

Durga Bhavan iMupparty “Capacitor Switching Transient Modeling and Analysis on An Electrical Utility DistributionSystem Using SIMULINK Software” University of Kentucky Master's Theses 2011

A. Kalyuzhny“Switching Capacitor bank Back-to-Back to Underground Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery

E. h. Camm “Shunt Capacitor Overvoltages and a Reduction Technique”, presented at the Panel Session on “Overvoltages: Analysis and Protection” IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, LA April 14, 1999

Thomas M. Blooming “Capacitor Failure Analysis: A Troubleshooting Case Study” Eaton Electrical

"IEEE Std 1036", IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors

Anna Baby, Dr. Jaimol Thomas, Tibin Joseph “Analysis of Voltage Collapse in the Kerala Power Grids” 2013 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI -2013), Coimbatore, INDIA January 04-06, 2013

Myeong-Hee Lee and Cha-Soo Park“The Protection System Optimization of 154kV Shunt Capacitor Bank in Korea” Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 3 No. 2 Page 141-145, 2013

Working Group 3.4.17 “Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications” IEEE Transacttions on Power Delivery, Vol. 11, No. 4, October 1996

Design and Development of a Modal Testing Machine for Aircraft Components

Yossanan Korsakulpanich[1*] and Chaiwat Klampol[1]

ABSTRACT

Experimental Modal Analysis (EMA) is the field of measuring and analyzing dynamic response of a structure when it is excited with a stimulus. EMA is the useful procedure in dynamic verifying Finite Element Analysis (FEA) results, using modal analysis to determine modal parameters (natural frequency, damping ratio, mode shapes) of the structure. The simple method for obtaining modal parameters is using roving impact test to identify natural frequencies, damping ratios, and mode shapes of the structure. Thus, the modal testing machine is used during the testing process. To gain accuracy data from the test, the machine requires special component to guide the modal hammer to hit onto a center of grid marks on specimen, it must also prevent the hammer from rebound and hit to the same grid mark twice. As the second hitting of the hammer will created error data recording. Other than that, the specimen has to be clamped firmly to avoid from others vibration during the test. Hence, to prevent from many errors during the testing procedure, modal testing machine is designed and built.

This paper describes the configuration and function of the modal testing machine which composed of: An impact hammer (modal hammer) which is attached to a moveable part of the machine. It can be increased the weight start at 2 kg and higher by adding metal piece onto the top of the moveable part. An accelerometer is attached to underneath of the same grid mark of specimen. Using slow impact velocities in the range of 1 to 5 m/s. Hitting force and acceleration of the impact event are measured using a force sensor and an accelerometer respectively to a function of time.

Key Words: modal analysis, structural frequency response testing, structural joint vibration, modal testing

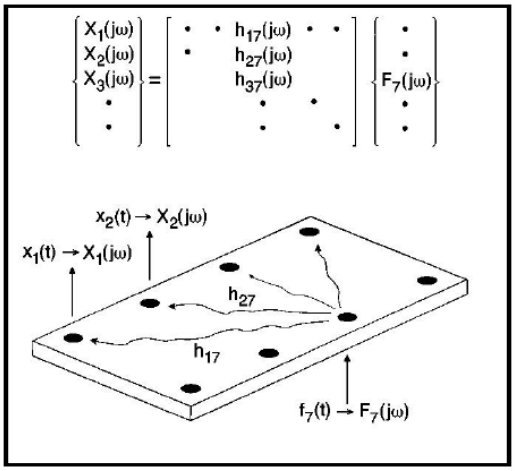
*Corresponding author; e-mail address: korsakulpanich@hotmail.com

[1]Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkhen Campus, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

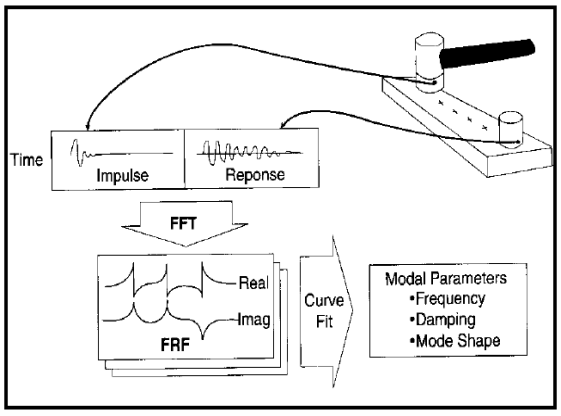
This study is in an area of structural behaviors to help prevent failure occur in aircraft joints. The study using modal analysis to help figure out how the vibration is affect to either the size of fasteners or the clearance of joints that being clamped on the aircraft structure (Figure 1-2). The accuracy of data receive from the calculation and from the prediction using modal analysis method is provided more safety to the aircraft design (Gursky, 2011). The study will also help design engineers to have simple tool that gives accurate data for the modal analysis. Thus, the modal testing machine is designed and created to help in the process of testing (Prajunla, 2011).

The major component of the modal testing machine composed of: Two cylindrical sliding bars and a moveable plate that are used to install a modal hammer for vertical dropping test. Specimens locking device that is used to provide extra clamping force to both sides of the specimen and is provided quick alignment between the grid marks on the specimen and the center of the modal hammer tip.



Source: Brian and Mark (1999)

Figure 1 Mearsuring FRFs on a Structure



Source: Brian and Mark (1999)

Figure 2 Modal Testing

The modal testing machine is useful equipment to identify the modal parameters and help predict the failure occur in the structure. It helps figure out the energy level that will caused the structure to fail. Also the maximum impact force of the structure is also can be predicted. Moreover, the major factors that have to be considered simultaneously to the use of the modal testing machine such as: the shape of specimen, the specimen parameters, the type of hammer tips, as well as the weight and the height of each testing process. (Figure 2)

MACHINE'S CONFIGURATION

The modal testing machine (Figure 3) with low speed and low energy consumption is designed and created for the testing process in experimental modal analysis of aircraft structural components. The weight can be adjusted ranging from 2 kg up to 20 kg respectively by adding metal weight to the top of the moveable plate. The specimen can be attached firmly to the specimen locking device which can be moved in X and Y axes, to help align the grid mark on the specimen to the tip of the impact hammer. The moveable plate can move up and down in Z axis using linear bearing slide on the surface of cylindrical sliding bars. (Figure 4)

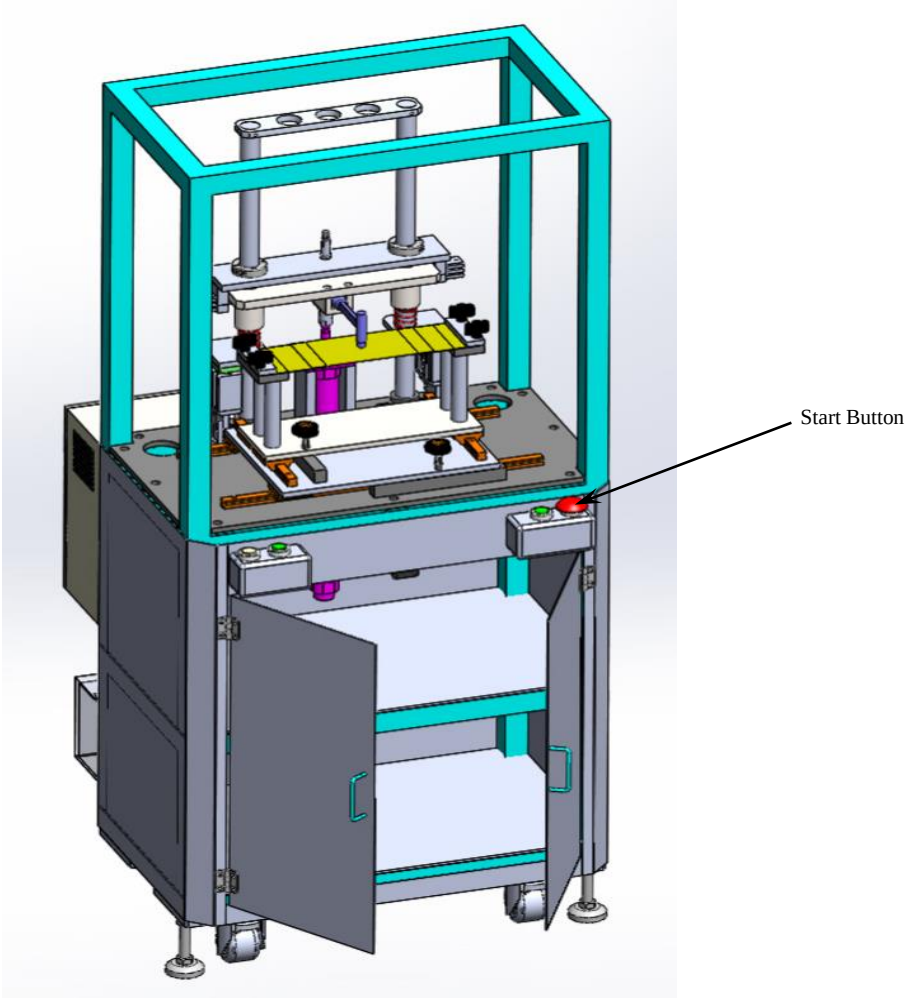
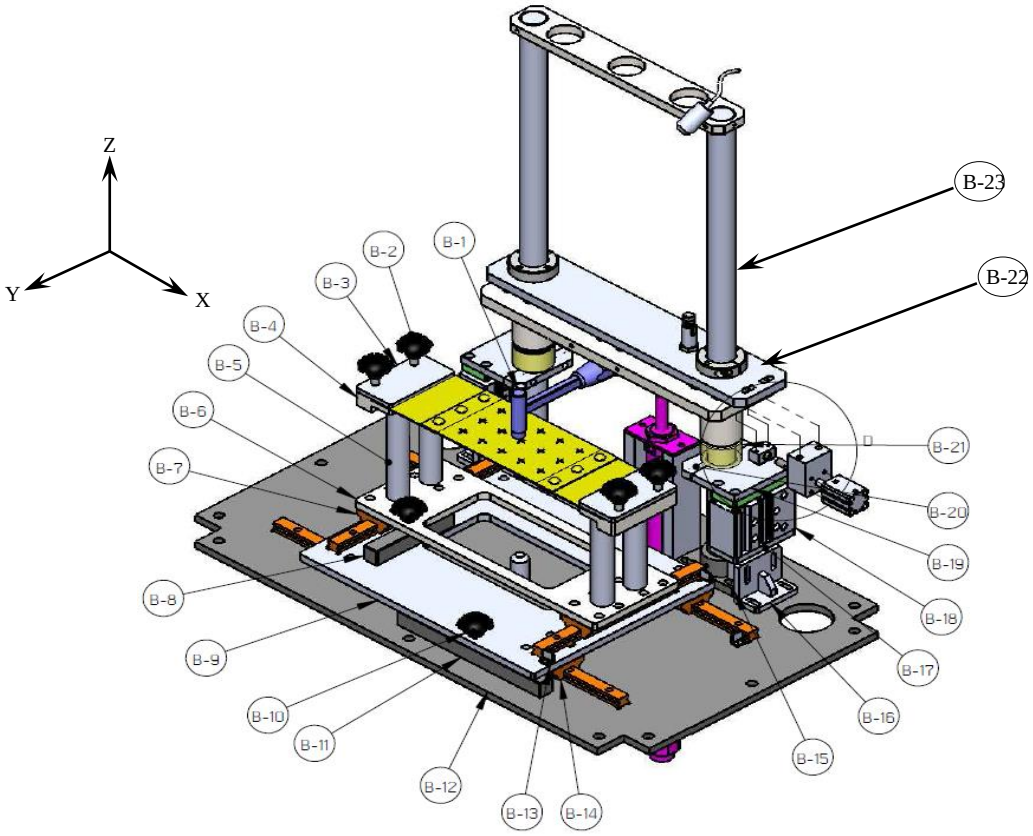


Figure 3 Modal Testing Machine Diagram



B-1 : Impact Hammer

B-2, B-10 : Adjustable Knob

B-3, B-4 : Specimen Locking Device

B-5 : Locking Device Support

B-6, B-9 : X and Z axis Adjustable Support Base

B-7, B-14 : Sliding Rail

B-8, B-11 : Adjustable Knob Support

B-21 : Spring Anti Rebound System (SARS)

B-22 : Moveable Plate

B-23 : Cylindrical Sliding Bars

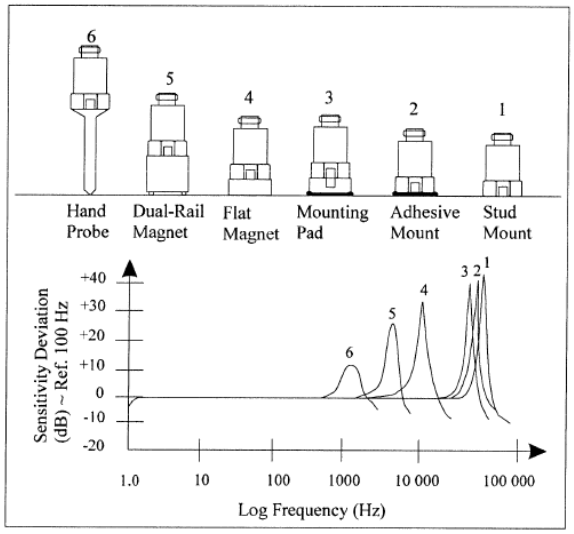
Figure 4 Modal Testing Machine Diagram

The impact hammer is attached into the middle and bottom of the moveable plate which made of 10 mm. thickness steel plate. Both sides of the plate are cut and assemble with linear bearings to reduce friction between the plate and the cylindrical steel bars when moving.

The accelerometer is attached to the underneath of the specimen, in order to measure the specimen fluctuation speed. There are six possible mounting techniques and their effects on the performance of a typical piezoelectric accelerometer. (Figure 5) The mounting configurations and corresponding graph demonstrate how the high-frequency response of the accelerometer may be compromised as mass is added to the system and/or the mounting stiffness is reduced.

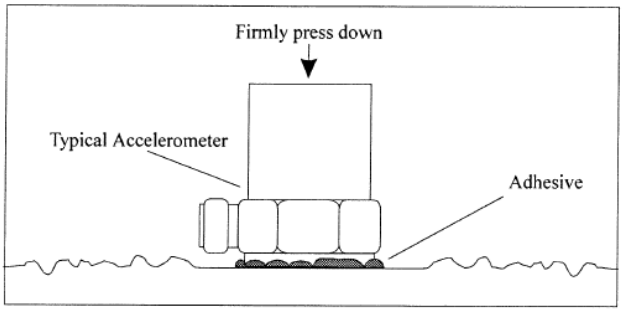
However, the adhesive mounting method is suitable for the machine due to the specimen surface cannot be adequate prepared for stud mounting because the test process is required temporary installation and simply remove, the quick-bonding gel (super glues) is used as it is not only provide good sensitivity, but also can be removed easily. (Figure 6)

As selected the quick-bonding gel (super glues) for mounting the accelerometer, the good practical for removal the super glue (Loctite 454) adhesive is to use Acetone. It must be allowed Acetone to penetrate the surface in order to properly react with the adhesive, so it is advisable to wait a few minutes before removing the sensor. After the debonding agent has set, it can use an ordinary open-end wrench for tear drop accelerometers. After attaching either, use a gentle shearing (or twisting) motion (by hand only) to remove the sensor from the test structure. (PCB Piezotronics, Miniature Ceramic Accelerometer)



Source: PCB Piezotronics

Figure 5 Assorted Mounting Configurations and Their Effects on High Frequency



Source: PCB Piezotronics

Figure 6 Direct Adhesive Mounting

The modal testing machine is operated conjunction with many measuring sensors to collect experimental data. Thus, it requires a data recording module to collect all of the test result for analyzing. First of all, the impact hammer is dropped to hit a grid mark on the specimen and senses hitting force during the impact. The tip of the hammer function to transfer impact force to the sensor, by changing the force to electrical signal and send to a Data Acquisition System (DAQ) which will

record all of the test data. Seconds, a tiny accelerometer size 6.4x6.4 mm. attach to the bottom of the specimen is provided constant-current signal and send to the DAQ module for recording.

The machine has an integral component called Spring Anti Rebound System (SARS) to prevent the impact hammer from bouncing and hit to the same position twice for accurate data recording. It composed of a pneumatic cylinder and a proximity switch. The SARS trigger signal is received from the start button of the machine. Once the machine start, the moveable plate dropped and moved pass the proximity switch, the proximity sense and direct signal to the control unit of the machine. Whenever the hammer hit the specimen, the control unit is extend the pneumatic cylinder upward to lift the moveable plate just slightly few seconds after the hammer hit the specimen to prevent the hammer from bouncing and hit the specimen twice.

The specimen is fabricated from Alclad 2024-T3 aluminum alloy which is an aviation grade material. Each set of specimen using 0.04 inch thickness, composed of one 4 x 8 inch and is joined with two pieces of 4 x 4 inch on both sides using AN20470AD4-4 solid rivet. The total weight of the specimen ranging from 8 – 13 g. (Figure 7)

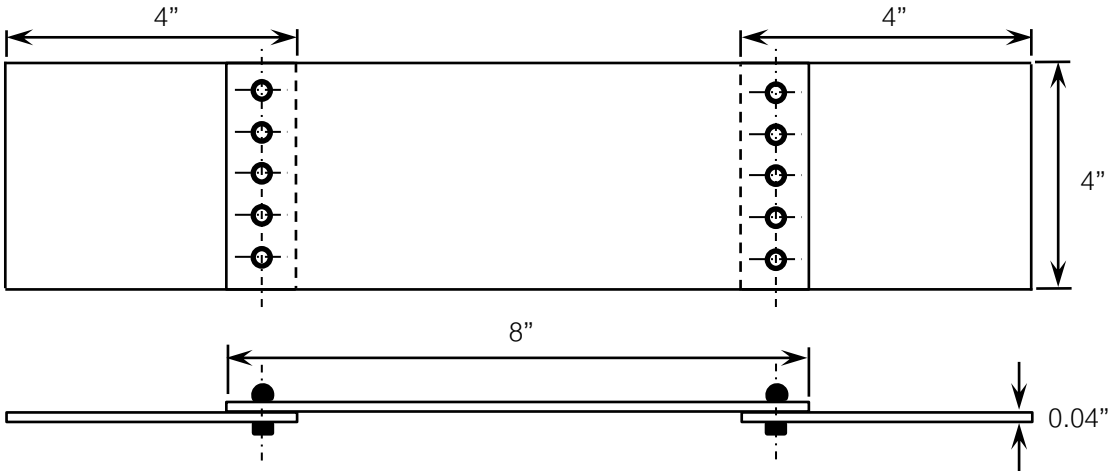


Figure 7 Specimen Assembly

TEST PROCEDURE

Drop force is involved with the test, thus the energy can be calculated from the following equation:

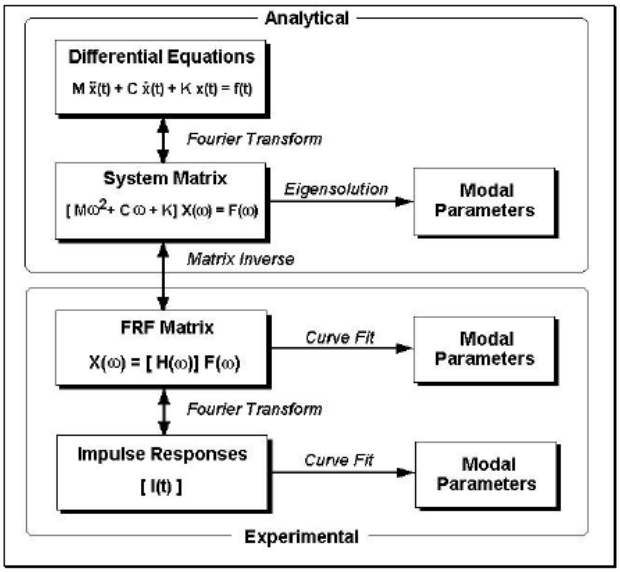
$$Ep = mgh$$

Ep = Hitting Energy (J) m = mass of impactor (kg)

g = center of gravity (m/s^2) h = height of the impactor (m)

The Mass of the moveable plate is started at 2 kg., the height is only 0.1 m (10 cm) and the center of gravity is 9.81 m/s^2. Thus, energy 3.924 Joule is used during the test. Impulse from the hammer and response from the accelerometer is in a time domain that is recorded to DAQ and being analyzed using LabVIEW software.

The Frequency Response Function (FRF) and Impulse response are used and analyzed to create the curves fit and lastly the modal parameter such as frequency, damping, and mode shape is received. (Figure 8)



Source: Brian and Mark (1999)

Figure 8 Sources of Modal Parameters.

From the LabVIEW software, impulse of the impact hammer and response of the accelerometer are recorded as shown in Figure 9 and 10.

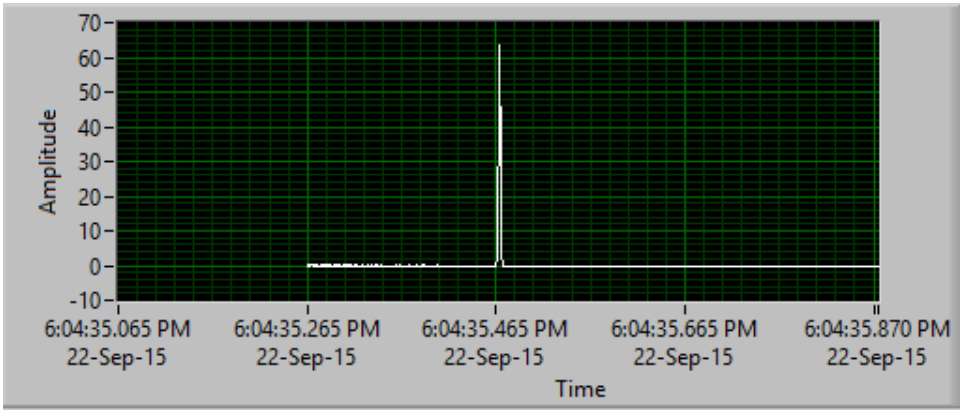


Figure 9 Impulse Signal

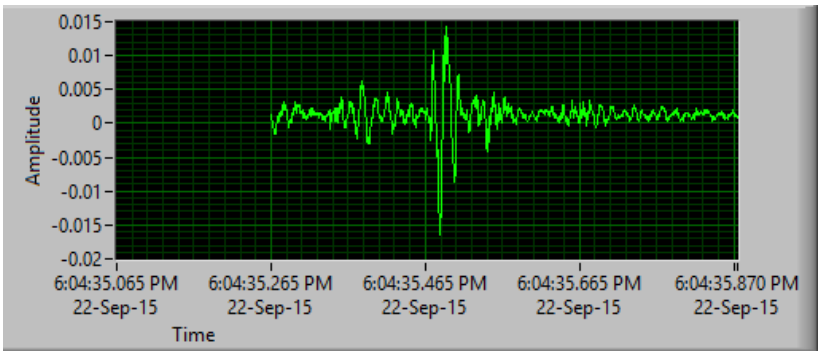


Figure 10 Accelerometer Response

CONCLUSION

The modal testing machine is designed and created to provide accurate data record during the experiment of modal study. It is not only guided the hammer to the center of a hitting point but also prevents the hammer from re-bouncing and hit at the same position twice. Furthermore, the specimen locking device is simply adjusted and operated through the knobs to unlock the specimen for easily align grid mark on the specimen to the center of the impact hammer. From pressing the start button, dropping the hammer down, extend the cylindrical to lift the plate upward, until moving each component back to its original position and ready for another test, the machine requires operator to just pressing the start button.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support for this study from Civil Aviation Training Center (CATC), Thailand is grateful acknowledged. I also truly appreciated the friendship, technical support and valuable discussion from fellow graduate students in the research room of aerospace engineering department.

REFERENCES

Bianca, I.G. 2011. **Application of Modal Analysis CAE to Optimize Aircraft Customization Design Process.** Diploma Thesis F1027 D.

Bonacci, N. 1987. **Aircraft Sheet Metal**. Jeppesen & Co., GmbH, Frankfurt, Germany.

Prajunla P. and P. Sirivoratum. 2011. **Parametric Study of Thin-Layer Boundary Properties to Emulate the Dynamics of Bolted Joints of an Aircraft Component Using Finite Element Method**. B.E. Thesis, Kasetsart University, Bangkok.

Schwarz, B.J. and M.H. Richardson. 1999. **Experimental Modal Analysis**. Available Source: http://www.systemplus.co.jp/support/data/techpaper/mescope/tech/28.pdf, December 05, 2014.

Skorupa, A., M. Skorupa, T. Machniewicz and A. Korbel. 2013. Fatigue crack location and fatigue life for riveted lap joints in aircraft fuselage. **International Journal of Fatigue.** 58 (2014): 209-217.

ระบบตรวจสอบคุณภาพของกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีเลเซอร์สแกน

Inspection Glue Route Quality in HDD Top Cover Assembly Using Laser Scanning

บัญชา จิตสงค์[1*] และ ทวีพล ซื่อสัตย์[1]

Bancha Jitsong[1*] and Taweepol.suesut[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอระบบวิสัยทัศน์แบบอัตโนมัติสำหรับการตรวจสอบคุณภาพเส้นทางเดินของกาวในฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้เทคนิคจากลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง ระบบวิสัยทัศน์นี้ ใช้กล้องเพื่อตรวจสอบและจับ ลักษณะเฉพาะของ การประกอบฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในส่วนกาว โดยสามารถเห็นลำแสงเลเซอร์ ที่ตั้งฉากกับชิ้นงานบนโต๊ะลำเลียง จากภาพของลำแสงเลเซอร์สีแดงที่ได้ผ่านตัวกรองแสงความยาวคลื่นย่านแคบที่ 650 นาโนเมตรเพื่อ ขจัดแสงตัดความยาวคลื่นที่ไม่พึงประสงค์จากสภาพแวดล้อมในการประมวลผลของภาพที่สอดคล้องกันและจากนั้นก็สกัดเส้นทางเดินของกาว เพื่อตรวจสอบ โดยรายละเอียดลักษณะเฉพาะที่ใช้นี่ เป็นลำแสงเลเซอร์ แสดงถึงพื้นที่ต่างๆ ที่พร้อมประกอบฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แสดงการเปลี่ยนแปลง แบบสามมิติจากภาพต้นแบบที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ภาพต้นแบบสามมิติจะถูกนำมาใช้เพื่อระบุเส้นทางที่มี ข้อบกพร่องของทางเดินกาวและ นำมาตรวจสอบคุณภาพในการผลิต โดยระบบยังมีประสิทธิภาพ สามารถบรรลุในการบูรณาการสำหรับกระบวนการทางอุตสาหกรรม

ABSTRACT

This paper presents the automated vision based system for inspecting glue route quality in hard disk drive top cover assembly using laser light sectioning is proposed. The machine vision camera captures a number of features of hard disk drive top cover assembly perpendicular to a conveyor table as seen by a laser strip light. The narrow bands pass filler of a wavelength of 650 nm for eliminating the light in order to cut off the unwanted wavelength from the environment. In the image processing unit, the image is aligned and then the glue route is extracted. The features used here are the laser strip profile at various locations along the hard disk drive top cover assembly formulating the 3D transformation from predefined template images. 3D templates are used to identify the defective route in the test image. This system is efficient and can achieve to integration in industrial processes as well as integration in industrial processes.

Key Words: image processing, hard disk drive, machine vision

[*]Corresponding author; e-mail address: Bancha.kmutt@hotmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[1]Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

คำนำ

โดยทั่วไปการวัดควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรม ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึง อุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน ก่อนส่งมอบถึงลูกค้า โดยสำหรับสินค้าอุตสาหกรรมบางอย่าง จำเป็นต้องกำหนดขนาดโดยมิติเชิงเรขาคณิต (Francisco de Asís Lopez a, Celestino Ordonez. 2014) เช่น ความกว้าง ความยาว ความสูง พื้นที่หน้าตัด ปริมาตร เป็นต้น เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดคุณภาพและราคาของสินค้า ซึ่งจุดมุ่งหมายของการวิจัยชิ้นนี้คือ การควบคุมคุณภาพ ของเส้นทางเดินของกาวในฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ก่อน ทำการประกอบ ในกระบวนการ ของสายการผลิต เพื่อทำการคัดแยกชิ้นส่วนที่ดีและมีควบคุมคุณภาพ แบบอัตโนมัติบนสายพานลำเลียง (Julio Molleda, Ruben Usamentiaga. 2013) โดยวิธีการวัดต่อเนื่องแบบไม่ทำลายวัตถุ ซึ่งเทคโนโลยีเครื่องจักรกลวิทัศน์ ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินขนาดของผลิตภัณฑ์ สำหรับการตรวจสอบนี้ ใช้วัดขนาดเป็นพื้นที่หน้าตัดและคุณภาพมิติของวัตถุ โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การวัดขนาดวัตถุที่มีรูปทรง สมมาตรและใช้เทคนิคการประมวลผลภาพแบบสามมิติ เพื่อหาข้อบกพร่องของทางเดินกาวบนผลิตภัณฑ์และตรวจสอบความถูกต้อง ก่อนทำการประกอบและส่งถึงลูกค้า โดยอาจมีข้อจำกัดด้านการวัดที่ไม่มีข้อมูลความหนา หรือในพื้นที่แสงมากทำให้ผลการวัดที่ได้ไม่ถูกต้อง วิธีการลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง ซึ่งใช้การจับภาพของลำแสงเลเซอร์ที่กระทบลงพื้นผิวของวัตถุ โดยเป็นการวัดแบบสามมิติ (N.Nunak & T.Suesut. 2007) เพื่อนำมาสร้างเป็นพื้นที่หน้าตัดและปริมาตรเพื่อตรวจสอบคุณภาพ โดยเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานหลายอย่าง เช่น การสร้างพื้นผิว (B.D. Bradley, M.J.D. Hayes, & A.D.C. Chan. 2008) การสร้างแบบจำลองพื้นผิวและการตรวจสอบชิ้นงาน (F.Pernkopf & P.O'Leary. 2003) และการวัดมิติเชิงเรขาคณิต การติดตามตำแหน่งจากภาพเลเซอร์ในมุมมอง 2 มิติและ 3 มิติในระบบนำทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ และการหาปริมาตรของวัตถุรูปทรงสมมาตรโดยใช้เทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง (F.Pernkopf & P.O'Leary. 2003) ซึ่งใช้วิธีการแบบเดียวกันแต่ใช้วิธีการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดจากสูตรทางเรขาคณิต และมีข้อจำกัดในการวางวัตถุ ซึ่งต้องวางวัตถุในแนวเส้นตรง สำหรับวิธีการที่ได้นำเสนอนี้สามารถหาปริมาตรรวมถึงตรวจสอบคุณภาพ ของวัตถุได้ใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณ เมื่อวางวัตถุในมุมเอียงต่าง ๆ

การศึกษาครั้งนี้นำเสนอการตรวจสอบคุณภาพเส้นทางเดินของกาวบนฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์วัดขนาดของวัตถุและเปรียบเทียบกับภาพต้นแบบ นำค่าที่ได้มาดูโดยเทคนิคการวัดปริมาตรจากภาพโครงร่างของแสงเลเซอร์ โดยทำการทดลองวางวัตถุในมุมเอียงที่แตกต่างกัน คือ ทำมุมกับสายพานลำเลียง -30° -15° 0° +15° +30° เพื่อศึกษาผลกระทบจากการวางวัตถุเอียง ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยยังมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ เพื่อความถูกต้องของผลการทดลองให้มากที่สุด เช่น กรณีจะแน่ใจว่าสายพานได้เคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอจึงมีการสอบเทียบโดยการวัดระยะการหมุนด้วยไม้บรรทัดตั้งบนสายพานดูการเคลื่อนที่แล้วเทียบกับเวลาที่จับ โดยในการทดลอง กล้องจะจับภาพที่คาบเวลาเท่ากันเสมอ เป็นต้น

วิธีที่ได้นำเสนอนี้จัดเป็นวิธีการวัดแบบไม่ทำลายวัตถุสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบคุณภาพการผลิตกับวัสดุอื่น ๆ ที่มีลักษณะรูปทรงสมมาตรได้เป็นอย่างดี

อุปกรณ์หรือวิธีการ

เทคนิคการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุ

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกเอาเทคนิคการวัดแบบไม่ทำลายโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุโดยการติดตั้งแสงเลเซอร์ให้เส้นของแสงเลเซอร์ฉายไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์ตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุที่ใช้ในการทดลองต่อไป

หลักการของระบบการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์

จากการศึกษาตาม (Figure 1) แสดงระบบแสงเลเซอร์ตัดขวางสำหรับวัดและตรวจสอบ ซีลยาง บนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งวัตถุตัวอย่างจะถูกวางบนสายพานลำเลียงที่สามารถปรับระดับความเร็วได้ โดยติดตั้งแสงเลเซอร์ให้เส้นของแสงเลเซอร์ฉายไปในทิศทางขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นแสงเลเซอร์ตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งเลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์แบบเส้นสีแดงมีความยาวคลื่น 650 nm ขนาด 16 mW (Roithner Laser Technik, Austria) และทำการเก็บข้อมูลรูปภาพโดยใช้กล้องรุ่น Gocator 2350A-3R-01 ความละเอียดในการรับภาพ 1032 Pixels x 778 Pixels และอัตราความเร็วในการรับภาพ 30 เฟรมต่อวินาที

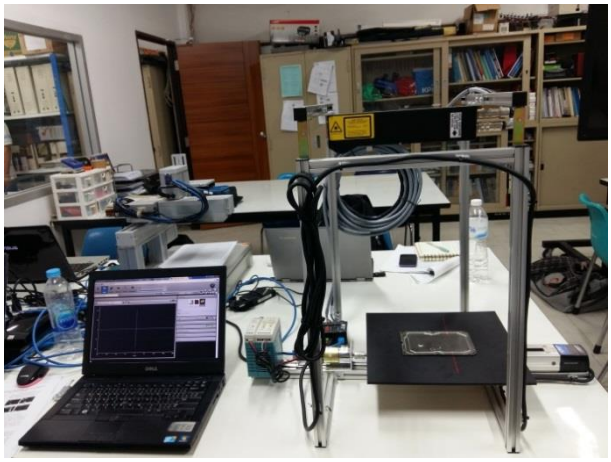


Figure 1 Overall system structure test facility

หลักการใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางเป็นเทคนิคการวัดรูปทรงที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความสะดวกและง่ายในการออกแบบ โดยวิธีนี้เป็นการฉายแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของวัตถุ เพื่อให้เกิดเป็นลักษณะตามพื้นผิวของวัตถุที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ ซึ่งส่วนมากแล้วแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์นี้จะใช้เส้นแสงเลเซอร์สีแดง เนื่องจากนำมาวิเคราะห์และประมวลผลได้ง่ายและช่วยลดขั้นตอนในการปรับแต่งรูปภาพ แสงที่กระทบกับพื้นผิวของวัตถุจะถูกจับภาพและบันทึกไว้ด้วยกล้องที่วางทำมุมเอียงกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ โดยข้อมูลรูปภาพที่ได้มาจะเปรียบเสมือนเป็นข้อมูลความสูงและความกว้างของ แต่ละจุดบนพื้นผิวของวัตถุ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ก็จะได้ข้อมูลในส่วนถัดไปของวัตถุในลักษณะของภาพตัดขวางของแต่ละส่วนดัง (Figure 2) และนำมารวมกันเพื่อสร้างเป็นระบบพิกัดสามมิติที่เป็นตัวบอกได้ถึงความกว้าง ความยาวและความสูงของวัตถุนั้น ๆ

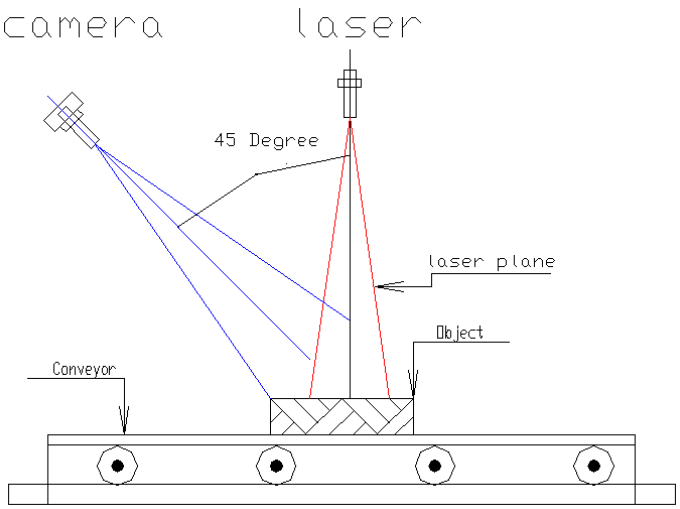


Figure 2 HDD top cover of the slit scanner for strip shape measurement

วัตถุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ในการศึกษางานวิจัยนี้ใช้ เวอเนียร์ทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาวและความสูงของเส้นทางเดินกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากวัตถุ ตัวอย่างเพื่อทำการสอบเทียบค่าที่ได้จากวิธีการที่ได้นำเสนอกับค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ (Figure 1) ของระบบการวัดโดยใช้แสงเลเซอร์ตัดขวางวัตถุความผิดพลาดของการวัดความยาวของวัตถุและคุณภาพ

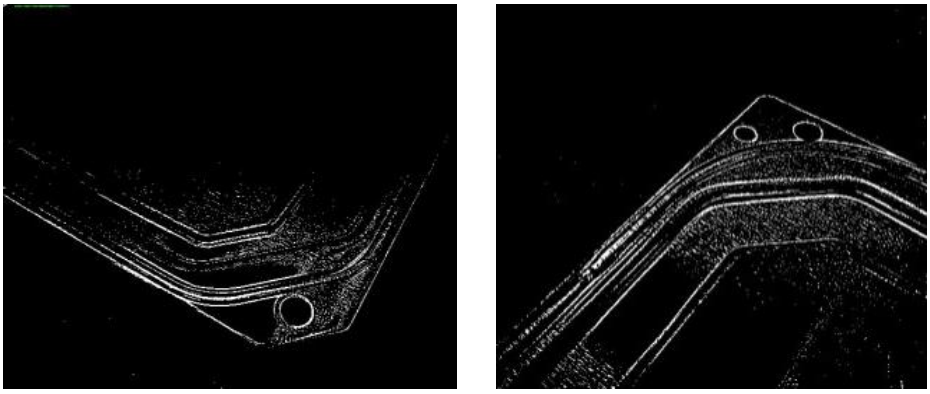


Figure 3 Profiles computed from HDD top cover strip

ตัวอย่างแสดงภาพขาวดำของลักษณะเฉพาะของเส้นทางเดินของกาวบนฝาครอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การประมวลผลภาพ

ในการศึกษางานแสดงรายละเอียดจาก (Figure 4) แสดงขั้นตอนการประมวลผลภาพ และ (Figure 5) แสดงภาพที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งถูกดำเนินการโดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2013 และรับภาพมาจากกล้อง Gocator ทำการปรับปรุงภาพก่อนการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดและตรวจสอบคุณภาพ จุดข้อบกพร่องของทางเดินกาว โดยแต่ละกระบวนการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. Extract Color Planes (RGB – Red Plane 8 Bit Image) เป็นกระบวนการดึงโครงร่างของแสงเลเซอร์สีแดงที่ต้องการออกจากภาพ แล้วแปลงภาพที่ได้เป็นภาพ 8-bit grayscale
2. Threshold Setup and Lookup Table เป็นกระบวนการแยกโครงร่างของแสงเลเซอร์ที่มีค่าความเข้มของแสงอยู่ใน Range ตามที่ต้องการออกจากภาพและเปลี่ยนภาพให้เป็น Full Grayscale [0, 255]
3. Profile Extraction (Center of Gravity) หรือ COG เป็นกระบวนการหาค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละคอลัมน์ของภาพ เมื่อหาครบทุกคอลัมน์ จะได้เส้นโครงร่างของแสงเลเซอร์
4. Dimensional Quality Inspection เป็นกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานตามค่ามาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ของแต่ละจุดบนตัวชิ้นงาน

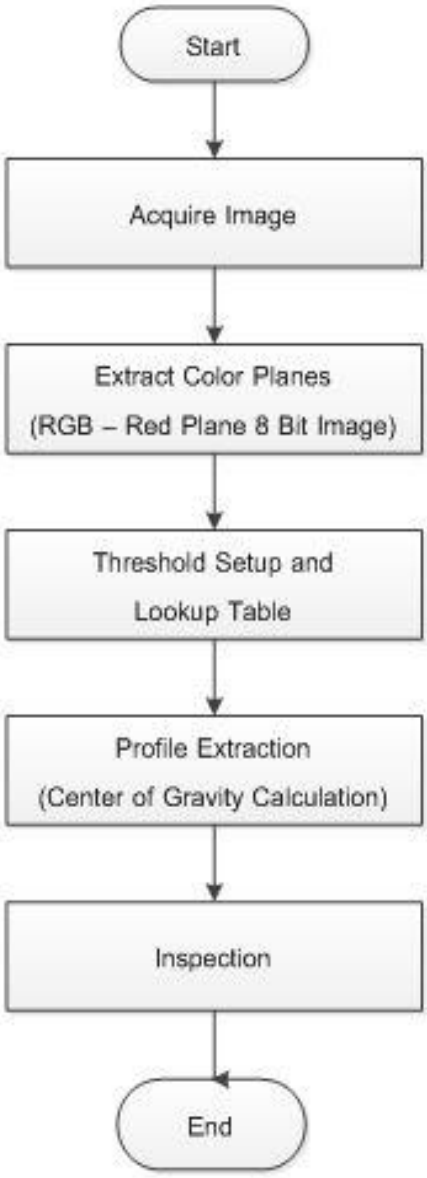


Figure 4 Feedback block diagram of a shape control process

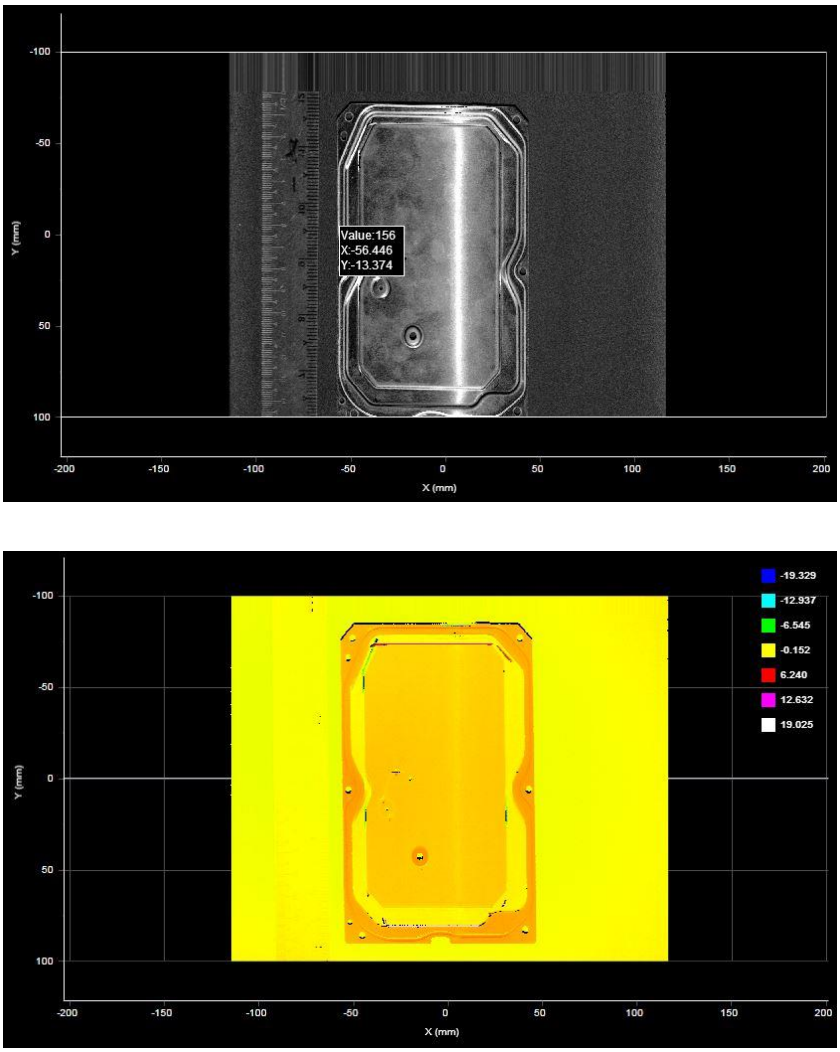


Figure 5 HDD top cover of the laser stripe scanner

การคำนวณหาเส้น COG

ในการศึกษางานแสดงรายละเอียด วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Central of Gravity) คือการหาค่าเฉลี่ยของพิกัดของภาพ จากแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนวัตถุ เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความกว้างและความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันทุกจุด การหา COG คือการหาค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละคอลัมน์ของภาพ ดังสมการข้างล่างมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$COG = \frac{\sum y.I(y,x)}{\sum I(y,x)} = \frac{W_m}{m} \qquad (1)$$

$I(y,x)$	คือความเข้มของระดับสีเทาและมีค่าน้อยกว่า Threshold
y	คือแถวในแนวแกน y
W_m	คือผลรวมของค่าความเข้มของระดับสีเทาคูณกับค่าตำแหน่งของแถว y
m	ผลรวมของค่าความเข้มระดับสีเทา

การคำนวณหาความยาวของวัตถุ

ในการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียด วิธีการการคำนวณหาความยาวของวัตถุ โดยใช้สมการความเร็วเส้นตรงคือความเร็วไปหน้าหรือถอยหลัง วัดเป็นแนวตรง ดังสมการข้างล่างมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$V = \frac{s}{t} \qquad (2)$$

ดังนั้นความยาวของวัตถุ

$$s = V.t \qquad (3)$$

V ความเร็วของสายพานลำเลียง (มิลลิเมตร/วินาที)

s ความยาวของวัตถุ (มิลลิเมตร)

t เวลาที่วัตถุตัดผ่านเส้นแสงเลเซอร์ (วินาที)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการวัดในแบบต่าง ๆ

จากการศึกษาและทดสอบสามารถแสดงผลได้ จากเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดในการวัดตรวจสอบคุณภาพเส้นทางเดินของกาว ในฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เมื่อวางวัตถุ -30° -15° 0° +15° +30° โดยแสดงใน (Table 1, Figure 5) วัตถุ ตัวอย่าง เช่น ฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สามารถ แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุด 1.54% 1.48% และ 1.35% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำสุด 1.46% 1.38% และ 1.32% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 1.49% 1.41% และ 1.34% ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.03% 0.04% และ 0.02% ตามลำดับตามลำดับ

Table 1 Comparative results of measurement methods error

Degree	Material HDD#A (%)	Material HDD#B (%)	Material HDD#C (%)
-30	1.48	1.40	1.35
-15	1.50	1.48	1.32
0	1.54	1.45	1.34
+15	1.50	1.36	1.35
+30	1.46	1.38	1.34
Mean Error	1.49	1.41	1.34

จากการศึกษาเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการวัดตรวจสอบคุณภาพเส้นทางเดินของกาวในจุดควบคุมคุณภาพของวัตถุซึ่งใช้วิธีจากการทดลองวางวัตถุแต่ละแบบในองศาต่าง ๆ พบว่าค่าที่ได้จากวิธีการที่ได้นำเสนอกับค่าที่ได้จากการวัดและตรวจสอบจากเครื่องมือจริง มีค่าใกล้เคียงกัน มีความแม่นยำอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ คือค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ย 1.41% จากสามกลุ่มตัวอย่างค่าความผิดพลาดโดยรวมที่เกิดขึ้น เกิดมาจากวิธีการที่ใช้ในการหาเนื่องจากเป็นการรวมพื้นที่หน้าตัดของแต่ละส่วนของวัตถุเข้าด้วยกัน และถ้าการประมวลผลภาพมีความผิดพลาดอยู่แล้วเมื่อคำนวณ ก็จะผิดพลาดให้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สรุป

ผลการทดสอบวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้ให้ผลลัพธ์ในการวัดระบุเส้นทางที่มี ข้อบกพร่องของทางเดินกาวของวัตถุที่มีความแม่นยำสูงและมีค่าเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดค่อนข้างต่ำ และจะมีความผิดพลาดอยู่บ้างพอสมควรในการวัดและตรวจสอบแต่ก็ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการคัดฝาครอบด้านบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ หรือนำมาตรวจสอบวัตถุที่ไม่ได้ต้องการความแม่นยำสูงมาก เป็นต้น และที่สำคัญระบบได้พัฒนาขึ้นให้มีความเร็วในการประมวลผลมากขึ้นเป็นจุดเด่นรวมถึงต้นทุนในการผลิตต่ำลงเมื่อเทียบกับในอดีต

นอกจากนั้นวิธีการที่ได้นำเสนอนี้อาจเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปเป็นระบบอัตโนมัติแบบระบบปฏิบัติการแบบเวลาจริง และพัฒนาให้เพิ่มความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ระบบคัดแยกและตรวจสอบขนาดวัตถุดิบ ระบบคัดแยกและตรวจสอบขนาดชิ้นส่วน ระบบคัดแยกและตรวจสอบขนาดผลผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหารเป็นต้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการ ระบบโรงงานอุตสาหกรรมอัตโนมัติ ที่ช่วยเอื้อเฟื้อสถานที่ ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

Francisco de Asís Lopez a, Celestino Ordonez. 2014. Point cloud comparison under uncertainty. Application to beam bridge measurement with terrestrial laser scanning. **Science Direct**: 250-264.

N.Nunak & T.Suesut. 2007. Measuring geometric mean diameter of fruit and vegetable using computer vision. **International Conference on Engineering and Environment-ICEE**: 1062-1067.

B.D. Bradley, M.J.D. Hayes, & A.D.C. Chan. 2008. A simple low cost 3D scanning system using the laser light-sectioning method. **IEEE conference on Instrumentation and Measurement Technology (I2MTC)**: 1155-1158.

F.Pernkopf & P.O'Leary. 2003. Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces. **NDT&E International**: Vol.36, 2003, 609–617.

Julio Molleda, Ruben Usamentiaga. 2013. An improved 3D imaging system for dimensional quality inspection of rolled products in the metal industry. **Science Direct**: 1186-1200.

การศึกษารูปแบบการไหลของของไหลผ่านวัตถุรูปวงกลม

Study of Flow Characteristics around a Circle

จิรโรจน์ บูรณะโรจน์[1*] และ สืบสกุล คุรุรัตน์[1]

Jirarote Buranarote[1*] and Suabsakul Gururatana[1]

บทคัดย่อ

รูปแบบของการไหลของของไหลผ่านวัตถุรูปวงกลม 2 มิติ ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 1 ถึง 100,000 จะเกิดขึ้น 4 รูปแบบได้แก่การไหลแบบไม่แยกตัวการไหลแบบแยกตัวการไหลแกว่งและการไหลแยกชั้นราบเรียบ โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (ANSYS FLUENT) ได้ถูกนำมาศึกษารูปแบบของการไหลของอากาศ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศของวัตถุรูปวงกลม 2 มิติจากทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าจากการจำลองการไหลผลการวิเคราะห์รูปแบบของการไหลที่เกิดขึ้นพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วของอากาศและพลังงานจลน์นั้นมีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อการไหลทั้ง 4 รูปแบบ

ABSTRACT

The characteristics of Laminar flow around a circle are studied, Reynolds numbers with a range of $1 \leqslant Re \leqslant 100{,}000$. Among the flow field, four different flow patterns, flow with no separation, flow with separation, flow with oscillating wake, and flow with laminar boundary layer wake, can be observed. The commercial computational fluid dynamics software, ANSYS FLUENT, is used to investigate the flow field and the experimental results of drag coefficient of two dimensional circle are used to compare numerical results. The results show that the increased velocity and kinetic energy clearly affect four different flow patterns.

Key Words: Laminar flow, sphere, computational fluid dynamics

* Corresponding author; e-mail address:Jirarote@eng.src.ku.ac.th

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ชลบุรี 20230

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Siracha, Kasetsart University, Chonburi 20230

คำนำ

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุจะมีรูปแบบการไหลต่างๆ มากมาย โดยรูปแบบของการไหลต่างๆ นั้น จะส่งผลโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน การศึกษารูปแบบการไหลและค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านนั้นเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการออกแบบทางด้านวิศวกรรม ทั้งในด้านของวิศวกรรมยานยนต์ วิศวกรรมพลังงาน วิศวกรรมการบินและในด้านอื่นๆ ที่อาศัยหลักการของอากาศพลศาสตร์ช่วยในการออกแบบ

สำหรับการไหลของอากาศผ่านวัตถุทางกลมนั้นในทางทฤษฎีพบว่ามีรูปแบบการไหลของอากาศที่น่าสนใจ 4 รูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบไม่แยกตัว (Flow with no separation), การไหลแบบแยกตัว (Flow with separation) การไหลแกว่ง (Flow with oscillating wake) และการไหลแยกชั้นราบเรียบ (Flow with Laminar boundary layer wake) (Munson et al., 2013) (Figure 1 - 4)

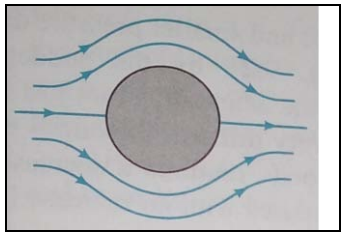


Figure 1Flow with no separation (Munson et al., 2013)

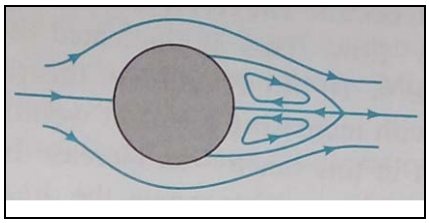


Figure 2Flow with separation (Munson et al., 2013)

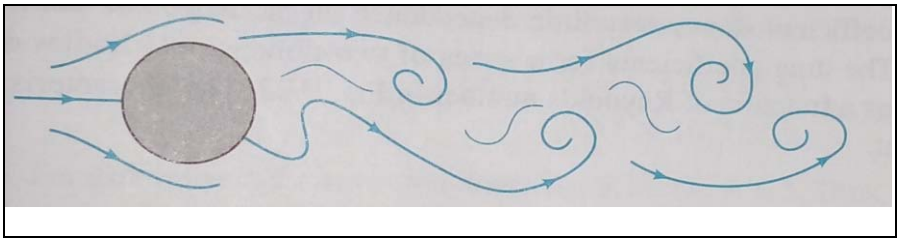


Figure 3Flow with oscillating wake (Munson et al., 2013)

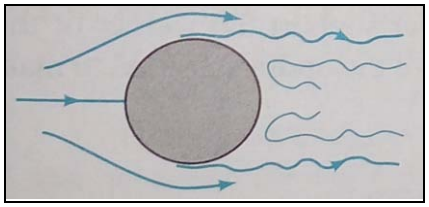


Figure 4 Flow with Laminar boundary layer wake (Munson et al., 2013)

ในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (ANSYS FLUENT) ศึกษารูปแบบของการไหลของอากาศผ่านวัตถุรูปวงกลมที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่างๆ ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ที่มีตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 1 ถึง 100,000 เพื่อที่จะได้ทราบว่ารูปแบบการไหลแต่ละแบบนั้นเกิดขึ้นในช่วงตัวเลขเรโนลด์เท่าใด

นอกจากนี้ทำการประเมินความสามารถในการจำลองการไหลของโปรแกรมโดยการนำค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศของวัตถุรูปวงกลม 2 มิติ จากการทดลอง (Munson et al., 2013) มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองการไหล

ทฤษฎีและหลักการ

สมการควบคุมของการไหลแบบราบเรียบนั้น ประกอบไปด้วย สมการกฎทรงมวล และสมการโมเมนตัม โดยสมมุติฐานของการศึกษานี้ได้แก่ เป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้, เป็นการไหลในสองมิติ, ไม่มีการถ่ายเทความร้อน และเป็นสภาวะคงตัว สมการควบคุมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial v}{\partial \mathrm{y}}=0 \tag{1}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial \mathrm{x}}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{x}}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial \mathrm{x}^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial \mathrm{y}^2}\right) \tag{2}$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial \mathrm{x}}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{y}}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial \mathrm{x}^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial \mathrm{y}^2}\right) \tag{3}$$

โดยที่ คือ μ สัมประสิทธิ์ความหนืด , ρ คือความหนาแน่นและ P คือค่าความดัน ในส่วนค่า u และ v ได้แก่ความเร็วตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ สำหรับสมการควบคุมจะถูกทำให้ไม่ต่อเนื่อง (Discretization) โดยวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method, FVM) สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการประมวลผลแบบทำซ้ำ (Iterative method) มีค่า10^{-4} สำหรับทั้งสมการกฎทรงมวล และสมการโมเมนตัม

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1.เครื่องคอมพิวเตอร์ core i3 CPU 3.4 GHz

2.โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (โปรแกรม ANSYS FLUENT)

ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาและรวบรวมทฤษฎี ข้อมูล เอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลผ่านวัตถุรูปวงกลม

2. สร้างแบบจำลองการไหลของอากาศผ่านวัตถุรูปวงกลม 2 มิติ โดยขนาดของช่องทางไหลกว้าง 60 เมตร ยาว 90 เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมเท่ากับ 1 เมตร (Figure 5)

3. สร้างตาข่ายข้อมูลพร้อมทั้งกำหนดทางเข้า ทางออก และพื้นผิววงกลมที่ของไหลไหลผ่าน ใช้รูปแบบของตาข่ายข้อมูลเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยที่ผิวของวงกลมจะมีขนาดของตาข่ายข้อมูล 0.03 เมตร และขยายขนาด

ของตาข่ายข้อมูลโดยที่ผิวทางเข้าและทางออกจะมีขนาดของตาข่ายข้อมูล 15 เมตร โดยมีจำนวนจุดตัดของตาข่ายข้อมูล (Nodes) ทั้งหมด 46,034 จุดตัด (Figure 6)

4.คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศของวัตถุรูปวงกลม 2 มิติโดยใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

5.การเช็ค Grid Independent คือการตรวจสอบว่าจำนวนของตาข่ายข้อมูลเพียงพอต่อการคำนวณหรือไม่โดยในการศึกษานี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเป็นตัวตรวจสอบว่าจำนวนของตาข่ายข้อมูลที่น้อยที่สุดที่ไม่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเปลี่ยนแปลง

6.นำผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง

7.วิเคราะห์รูปแบบของการไหลของอากาศ

8.สรุปผลการศึกษาและจัดทำบทความ

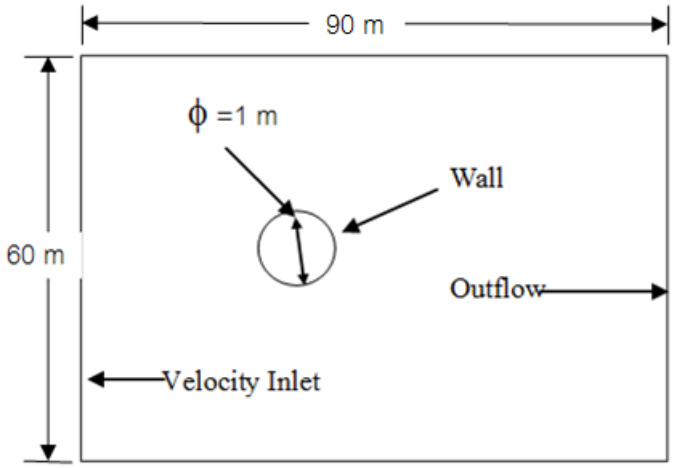


Figure 5 Computational domain and boundary conditions

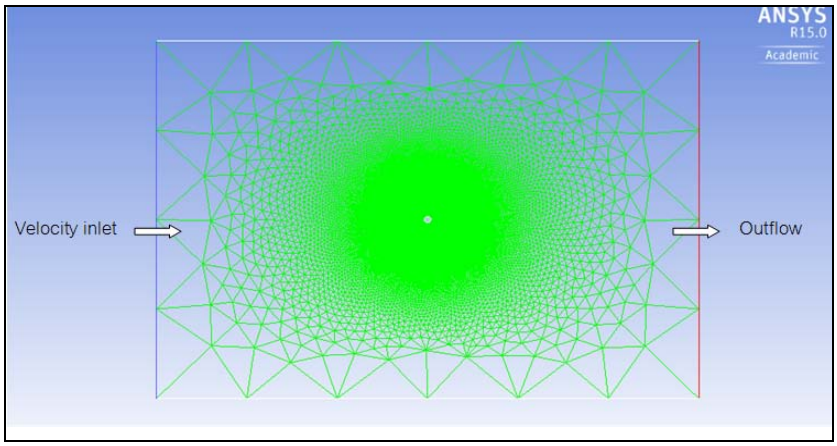


Figure 6 Mesh and boundary conditions

ผลการศึกษาและวิจารณ์

ผลการศึกษา

จากการจำลองการไหลของอากาศผ่านวัตถุรูปวงกลม 2 มิติ ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (ตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 1 ถึง 100,000) พบว่าโปรแกรมสามารถจำลองการไหลที่แตกต่างกันได้ 4 รูปแบบ

ใน Figure 7 และ 8 แสดงเวกเตอร์ความเร็วและเส้น Streamline ของอากาศผ่านวัตถุรูปวงกลมที่ตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 10 ซึ่งในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 1 ถึง 10 พบว่าทั้งเวกเตอร์ความเร็วและเส้น Streamline ของอากาศจะไหลอยู่ติดกับผิวของวัตถุตลอดการไหลโดยไม่เกิดการแยกตัว การ ไหลวนของอากาศด้านหลังรูปวงกลมนั้นมีความเร็ว 1.8 x 10^{-8} m/s ซึ่งมีปริมาณน้อยมากจึงถือได้ว่าการไหลนี้เป็นแบบการไหลไม่แยกตัว

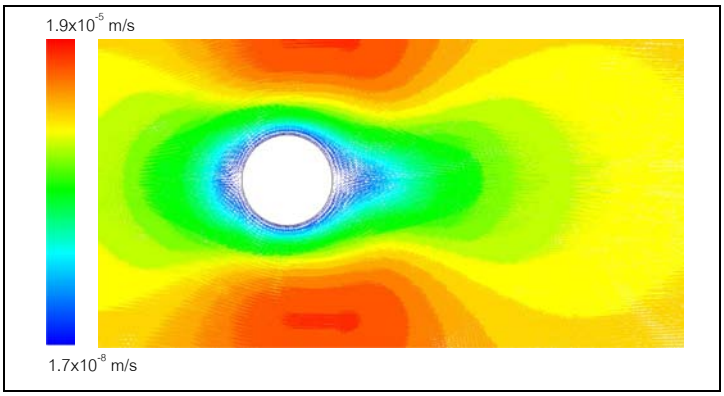


Figure 7Velocity Vector for flow around a circle, Reynolds number = 10

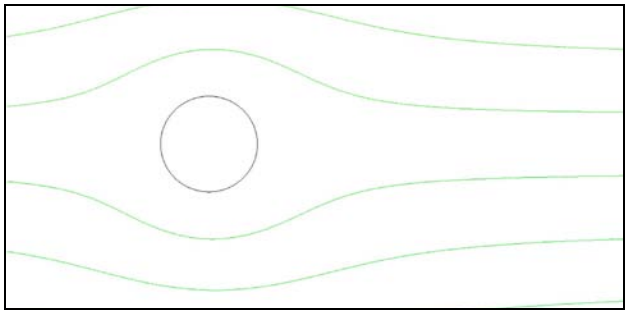


Figure 8 Streamline for flow around a circle, Reynolds number = 10

ใน Figure 9 และ 10 แสดงเวกเตอร์ความเร็วและเส้น Streamline ของอากาศผ่านวัตถุรูปวงกลมที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่า 100 ซึ่งในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 10 ถึง 100 ผลของเวกเตอร์ความเร็วแสดงให้เห็นความเร็วที่สูงที่ของด้านบนและล่างของรูปวงกลมแสดงถึงการแยกตัวของอากาศออกจากผิวของวงกลมซึ่งสอดคล้องกับเส้น Streamline ที่ขอบบนและล่างมีการเบี่ยงเบนอย่างชัดเจน สำหรับด้านหลังของรูปวงกลมนั้นมีการไหลวนของอากาศเกิดขึ้น โดยมีค่าความเร็ว 1.02 x 10^{-6} m/s การไหลวนที่เกิดขึ้นมี 2 ตำแหน่งขนาดใหญ่ จึงถือได้ว่าการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นเป็นการไหลแบบแยกตัว

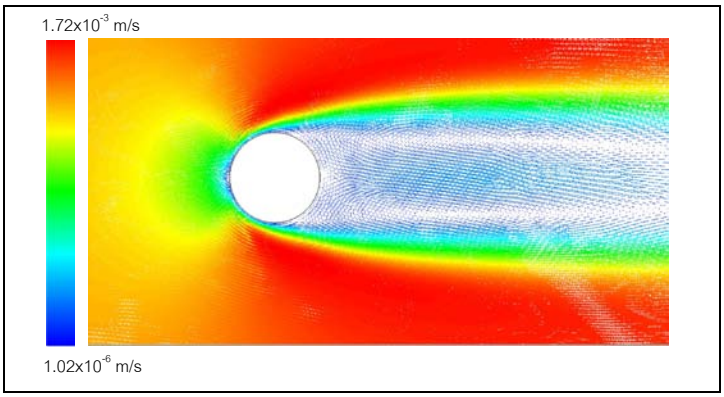


Figure 9 Velocity Vector for flow around a circle, Reynolds number = 100

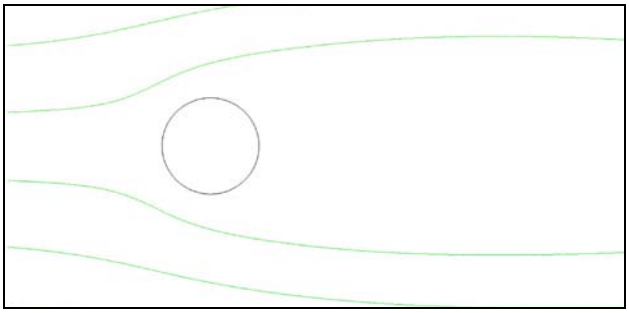


Figure 10 Streamline for flow around a circle, Reynolds number = 100

ใน Figure 11 และ 12 แสดงเวกเตอร์ความเร็วและเส้น Streamline ของอากาศผ่านวัตถุรูปวงกลมที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่า 1,000 ซึ่งในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 1,000 ถึง 10,000 เวกเตอร์ความเร็วแสดงการไหลวนที่ค่อนข้างไม่เป็นระเบียบหลายตำแหน่งสอดคล้องกับรูปแบบของเส้น Streamline ที่เกิดลักษณะวงกลมไม่เป็นระเบียบหลายตำแหน่งด้านหลังรูปวงกลม

ในส่วนด้านบนและล่างของรูปวงกลมยังสามารถเห็นค่าความเร็วที่สูงและเกิดการแยกตัวออกจากผิวได้อย่างชัดเจนอีกด้วยจากลักษณะของการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นถือได้ว่าเป็นแบบการไหลแกว่ง

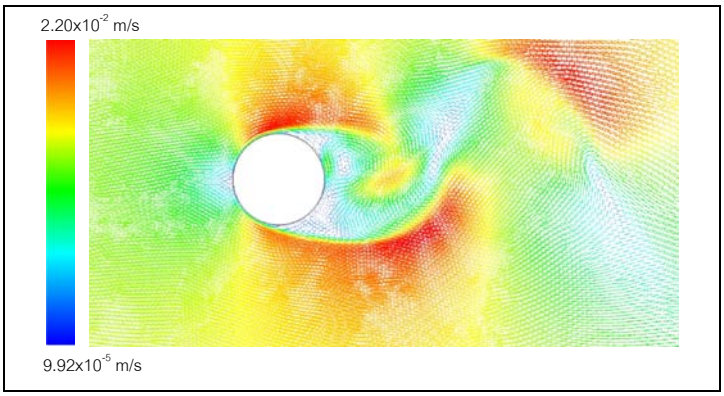


Figure 11 Velocity Vector for flow around a circle, Reynolds number = 1,000

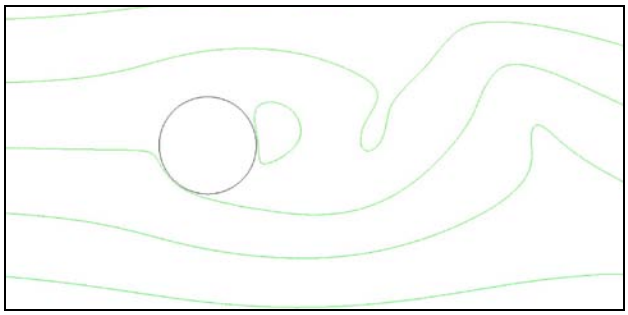


Figure 12 Streamline for flow around a circle, Reynolds number = 1,000

Figure 13 และ 14 แสดงเวกเตอร์ความเร็วและเส้น Streamline ของอากาศผ่านวัตถุรูปวงกลมที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่า 50,000 ซึ่ง ในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 10,000 ถึง 100,000เวกเตอร์ความเร็วและเส้น Streamlineแสดงให้เห็นการแยกตัวของอากาศที่ด้านบนและล่างของรูปวงกลมและการไหลวนด้านหลังมีปริมาณน้อยซึ่งสอดคล้องกับการไหลแยกชั้นราบเรียบ

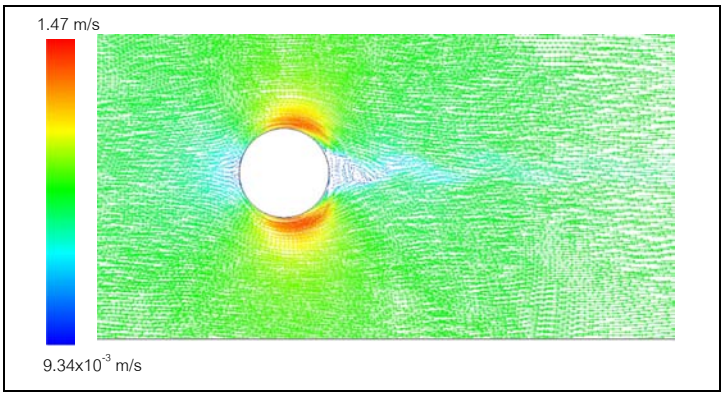


Figure 13 Velocity Vector for flow around a circle, Reynolds number = 50,000

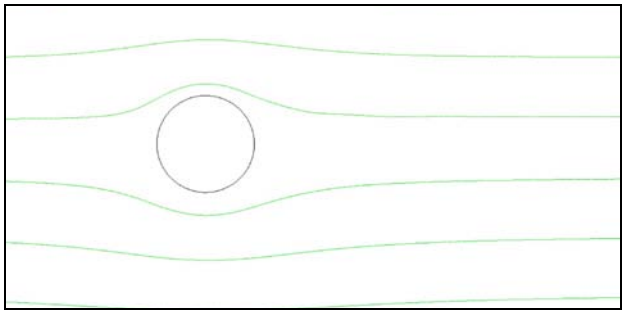


Figure 14 Streamline for flow around a circle, Reynolds number = 50,000

หลังจากนั้นนำผลมาเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบ (Validation) ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag coefficient, C_D) ที่ได้จากการจำลองการไหลสำหรับการไหลแบบราบเรียบและค่าจากการทดลองผลที่ได้แสดงใน Table1 พบว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อยกว่า 100 ให้ผลการคำนวณได้ค่อนข้างดี แต่เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าสูงขึ้นพบว่าผลการจำลองการไหลยังไม่ดีเท่าที่ควร

Table1 Drag coefficient for flow around a circle

Reynolds Number	Drag Coefficient	
	Experimental Results	Numerical Results
1	25.00	25.04
10	4.00	3.96
100	1.10	1.09
1,000	0.50	1.24
10,000	0.40	0.36
50,000	0.45	0.07
100,000	0.50	0.06

วิจารณ์ผลการศึกษา

รูปแบบการไหลที่เปลี่ยนไปของของไหลเป็นผลมาจากความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้ของไหลมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นซึ่งผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลกระทบอย่างชัดเจนทำให้เกิดรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามผลการศึกษา

สำหรับโปรแกรมจำลองการไหลนั้นพบว่าให้ผลการจำลองรูปแบบการไหลของอากาศและการไหลวนของอากาศที่เกิดขึ้นได้น่าพอใจ แต่เมื่อนำสมการสำหรับการไหลแบบราบเรียบของโปรแกรมมาใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศพบว่าผลที่ได้ยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นสมการสำหรับการไหลแบบราบเรียบของโปรแกรมยังต้องการการปรับปรุงสมการให้เหมาะสมกับการไหลและการทำนายค่าที่เกี่ยวข้องต่อไป

สรุปผลการศึกษา

รูปของการไหลของของไหลผ่านวัตถุรูปวงกลม 2 มิติ ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (ตัวเลขเรย์โนลด์ตั้งแต่ 1 ถึง 100 ,000) จะเกิดขึ้น 4 รูปแบบ คือ การไหลแบบไม่แยกตัว การไหลแบบแยกตัวคงที่ การไหลแกว่งและการไหลแยกชั้นราบเรียบ ลักษณะการไหลที่แตกต่างกันนั้นโดยเป็นผลมาจากความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นทำให้ของไหลมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้เกิดรูปแบบการการไหลแบบต่างๆ เกิดขึ้น ในส่วนโปรแกรมพบว่าสมการสำหรับการไหลแบบราบเรียบของโปรแกรมยังต้องการการปรับปรุงสมการให้เหมาะสมกับการไหลและการทำนายค่าที่เกี่ยวข้องต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา สำหรับห้องปฏิบัติการอุปกรณ์ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Munson, B. R., T. H., OKiishi, W. W., Huebschand A. P., Rothmayer. 2013. **Fluid Mechanics,** 7th EDITION. John Wiley and Sons. Singapore.

การพัฒนาดัชนีวัดความสำเร็จการพัฒนาแหล่งน้ำ ของสำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลาง กรมชลประทาน

Key Performance Indicators for the Office of Medium Scale Water Resources Development, Royal Irrigation Department

พงศกร มีบุษยา[1] และ ปิยนุช เวทย์วิวรณ์[2]

Pongsakron Meebutsaya[1] and Piyanut Wethyavivorn[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาดัชนีวัดความสำเร็จการ พัฒนาแหล่งน้ำ เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพตามแนวทาง และแผนการพัฒนาอย่างเป็นระบบของสำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลาง โดยเก็บข้อมูลจากกลุ่มผู้ที่มีส่วน ได้ส่วนเสียกับโครงการ ฯโดยแบ่งออกเป็นกลุ่มบุคลากรภายในสำนักฯ ผู้เกี่ยวข้องจาก ภายนอก และเกษตรกร ซึ่งได้ตรวจสอบ ความเหมาะสม ความสำคัญ ความพร้อมของข้อมูล และได้เพิ่มตัวชี้วัด รวมถึงปรับค่าน้ำหนักคะแนนของตัวชี้วัด โดย พัฒนาดัชนีวัดจากแบบสอบถาม และข้อเสนอแนะโดย นำไปทดลอง ใช้กับ โครงการอ่างเก็บน้ำห้วยตะคลองใหญ่ ซึ่งค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถวัดผลการปฏิบัติงานได้อย่าง ครอบคลุม ทั้งความคิดเห็นของผู้เกี่ยวข้องจากภายนอก รวมทั้งเกษตรกร เมื่อนำค่าที่ได้จากการพัฒนานี้มาใช้ พบว่าดัชนีชุดใหม่วัดได้ 3.343 ซึ่งเทียบกับค่าจากดัชนีชุดเดิม 3.410 พบว่าได้ผลน้อยกว่า แต่สามารถนำไปใช้พัฒนา และปรับปรุงการปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากมีตัวชี้วัดที่สะท้อนถึงความพึงพอใจของผู้เกี่ยวข้องจากภายนอกในด้านต่างๆเพิ่มจากดัชนีวัดเดิม เช่น ร้อยละความพึงพอใจของประชาชนต่อโครงการฯ ร้อยละของผลผลิตทางการเกษตรที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น

ABSTRACT

This research aimed to develop indicators to measure the success of water resources development in order to increase efficiency and effectiveness of the Office of Medium Scale Water Resources Development. The data were collected from stakeholders including in-house staff, external consultants and also end users, the farmers through questionnaire survey. The respondents were asked to identify the level appropriateness, significance, and data availability for each indicator. The respondents also added some important indicators and re-evaluate the weight of each indicator. The new set of indicators was used to measure the case study, Ta Kong Yai Creek Reservior. It was found that the score from this new set of indicators is 3.343 which is slightly lower than the score from former set of indicators, 3.410. However, it reveals new significant areas which can be improved and cannot be detected from the former indicators such as farmer's satisfaction and the increase in agricultural produces.

Key Words: Key Performance Indicators, Balance Scorecard, Water Resources Development

*Corresponding author;e-mail address: pong1986.3.7@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900

คำนำ

ภาครัฐจัดเป็นองค์กรที่มีส่วนสำคัญในการบริหารและการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะกรมชลประทานที่มีบทบาทสำคัญในการบริหารจัดการน้ำในภาคการเกษตร ภาค อุตสาหกรรม และภาคครัวเรือน การวัดผลการปฏิบัติงานเพื่อให้สามารถระบุได้ถึงปัญหาต่างๆ ในการดำเนินงานที่ต้องมีการปรับปรุงจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

ปัจจุบันกรมชลประทานมีการประเมินผลสัมฤทธิ์ของการปฏิบัติงานในโครงการ ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้วัดนั้นได้พัฒนาขึ้นมาจากแผนยุทธศาสตร์ ปี 2553 ถึง 2556 และใช่ประเมินผลสัมฤทธิ์ของการปฏิบัติงานตั้งแต่ปี 2556 ถึง 2559 โดยแบ่งตัวชีวัดออกเป็น 4 ด้าน และยังได้จำกัดผู้ประเมินผลสัมฤทธิ์ดังกล่าวเพียง บุคลากรภายใน (ผู้ปฏิบัติงาน) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนความเหมาะสมของตัวชี้วัดดังกล่าว พัฒนาตัวชี้วัดใหม่ที่สะท้อนผลสัมฤทธิ์ที่แท้จริง อีกทั้งยังเพิ่มกลุ่มผู้ประเมินที่มี ส่วนได้ส่วนเสียต่อโครงการเข้ามา

งานวิจัยนี้ได้พั ฒนาความเชื่อมโยงระหว่างเหตุ ผล และความต้องการ ของกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อโครงการ เพื่อการพัฒนาดัชนีวัดความสำเร็จให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์หลักในการวิจัย และสามารถระบุได้ถึงปัจจัยที่จะนำไปสู่ความสำเร็จ ของการบริหารงานในแต่ละด้านตั้งแต่การวางแผนงาน การควบคุมงานก่อสร้าง และการให้บริการ ตลอดจนผลการให้บริการ

อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาเกี่ยวกับ ดัชนีวัดความสำเร็จ หลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้เครื่องมือในการดำเนินการวิจัย คือ Balanced Scorecard และ Key Performance Indicators (KPI) เพื่อนำไปสู่การปฏิบัติงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทั้งสองเครื่องมือนี้ จัดเป็นดัชนีวัดผลงานในการปฏิบัติงาน โดยแนวคิดนี้เป็นประโยชน์อย่างมากในการบริหารองค์กรสมัยใหม่ เนื่องจากสามารถช่วยในการนำกลยุทธ์ไปสู่การปฏิบัติงานจริง โดยอาศัยการวัดหรือการประเมินอีกทั้งยังก่อให้เกิดความเข้าใจ ภายในองค์กร รวมทั้งเกิดการวัดผลการดำเนินการที่เกิดประโยชน์สูงสุดกับองค์กร โดยนำแบบสอบถาม มาใช้เก็บข้อมูลจากกลุ่มผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการพัฒนาดัชนีวัดความสำเร็จการ พัฒนาแหล่งน้ำในการเก็บข้อมูลของเครื่องมือทั้งสองตัวนี้ซึ่ง แบ่งแบบสอบถามออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ แบบสอบถามชุดที่ 1 สอบถามการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับการพัฒนาแหล่งน้ำที่ได้ รวบรวมตัวชี้วัดจากหน่วยงานต่างๆ รวมทั้ง เอกสารจากต่างประเทศ มาบรรจุลงในแบบสอบถาม แบบสอบถามชุดที่ 2 ให้ระบุระดับความสำคัญของตัวชี้วัด และจัดลำดับคะแนนการถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการนำข้อมูลจากแบบสอบถามมาใช้กับกระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์ลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) แบบสอบถามชุดที่ 3 ใช้ดัชนีชี้วัดความสำเร็จที่ได้จากการพัฒนาแล้วในโครงการกรณีศึกษา 1 โครงการ เพื่อนำผลคะแนนมาเปรียบเทียบกับดัชนีวัดความสำเร็จการบริหารองค์กรของสำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลางที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

ในส่วนของผู้ตอบแบบสอบถาม เป็นผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้ องกับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ ทั้งในส่วนของฝ่ายออกแบบ ฝ่ายก่อสร้าง ฝ่ายบริหารงาน และเกษตรกรผู้ได้รับประโยชน์จากโครงการ โดยแบ่งออกเป็น 3กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่มที่ 1 บุคลากรภายในสำนักพัฒนาแหล่งน้ำ กลุ่มที่ 2 บุคลากรภายนอกสำนักพัฒนาแหล่งน้ำ และกลุ่มที่ 3 เกษตรกรที่ ได้รับผลประโยชน์จากโครงการ โดยเลือกผู้ตอบแบบสอบถาม จากผู้ที่เป็นหัวหน้าฝ่ายหรือผู้บริหารที่มีประสบการณ์ทำงานในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแหล่งน้ำไม่ต่ำกว่า 10 ปี ยกเว้นเกษตรกร

โดยข้อมูล รวมถึง ความ เหมาะสมของตัวชี้วัดประสิทธิภาพการพัฒนาแหล่งน้ำ ที่ถูกเลือกนำมาใช้และผู้ตอบแบบสอบถ าม ซึ่งได้ ผ่านการตรวจสอบและให้คำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญด้านดัชนีวัดความสำเร็จการบริหารองค์กรแล้ว ดังแสดงใน ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดของแบบสอบถาม

Table 1 Summary of detailed questionnaires

รายละเอียด	การเก็บข้อมูล ครั้งที่ 1	การเก็บข้อมูล ครั้งที่ 2	การวัดประเมินผลการปฏิบัติงาน
วัตถุประสงค์	เพื่อตรวจสอบความสำคัญของตัวชี้วัดต่อประสิทธิผลของโครงการ และระบุความยากง่ายในการการวัด และการกำหนดตัวชี้วัด	เพื่อตรวจสอบความเหมาะสม และระบุค่าคะแนนถ่วงน้ำหนักของตัวชี้วัด	เพื่อตรวจสอบการวัดประเมินผลสัมฤทธิ์ของการปฏิบัติงานในโครงการ
แบบสอบถาม	แบบสอบถามแบ่งออกเป็น 3 ส่วน 1) ข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถาม -ข้อมูลทั่วไป -ประวัติการศึกษา 2) การตรวจสอบตัวชี้วัดโดยนำตัวชี้วัดของกรมชลประทานในปัจจุบันและ ,จากส่วนราชการอื่น , จากเอกสารวิชาการต่างประเทศมาสำรวจ -ความเหมาะสมในการใช้งาน -ความสำคัญในการตัดสินใจ -ความถูกต้องของข้อมูล -ความพร้อมของฐาน ข้อมูล 3) ข้อเสนอแนะ -ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	แบบสอบถามแบ่งออกเป็น 2 ชุด 1) แบบสอบถามชุดที่ 1 แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามแบบสอบถามในการเก็บข้อมูล ครั้งที่ 1 โดยใช้ตัวชี้วัดที่ได้จากข้อสรุปในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 2) แบบสอบถามชุดที่ 2สอบถามในการระบุค่าคะแนนถ่วงน้ำหนักของตัวชี้วัด	ตารางสรุปการประเมินผลสัมฤทธิ์ของการปฏิบัติงานในโครงการ
ผู้ตอบแบบสอบถาม	ผู้ตอบแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม 1)บุคลากรภายใน 10 คน ซึ่งมีประสบการทำงานในกรมชลประทานมากกว่า 10 ปี 2)ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องจากภายนอก 8 คน ซึ่งมีประสบการทำงานเกี่ยวข้องกับโครงการมากกว่า 2 ปี 3)เกษตรกรผู้รับประโยชน์ 20 คน ซึ่งมีพื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 100 ไร่	แจกแบบสอบถามให้กลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1	ผู้รวบรวมข้อมูล และเอกสารประกอบที่เกี่ยวข้อง
ผลสรุปการตอบแบบสอบถาม	คัดเลือกตัวชีวัดที่มีค่าเฉลี่ยความสำคัญของตัวชี้วัด มากกว่า 50% ขึ้นไป หรือมีค่าเฉลี่ยสูงในบางกลุ่มของผู้ตอบแบบสอบถาม และตัวชี้วัดที่ได้จากข้อเสนอแนะของผู้ตอบแบบสอบถาม	ผู้ตอบแบบสอบถามได้ระบุตัวชี้วัดและค่าคะแนนถ่วงน้ำหนักของตัวชี้วัด	ดัชนีวัดความสำเร็จที่ได้พัฒนาขึ้นเท่ากับ 3.343

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลจากการตอบแบบสอบถาม ความเหมาะสมของตัวชี้วัด การจัดลำดับคะแนนการถ่วงน้ำหนักของตัวชี้วัด ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย พบว่า ตัวชี้วัดที่ผู้ตอบแบบสอบถามให้คะแนนความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการวิจัย มีทั้งหมด 32 รายการ จากตัวชี้วัดทั้งหมดที่ผู้วิจัยเลือกนำมาใช้ในงานวิจัย 82 รายการ โดย

นำมาจากตัวชี้วัดที่กรมชลประทาน 29รายการ ตัวชี้วัดที่นำมาจากหน่วยงานอื่น 31รายการ ตัวชี้วัดที่นำมาจากเอกสารของต่างประเทศ 20รายการ และตัวชี้วัดที่ได้จากข้อเสนอแนะของผู้ตอบแบบสอบถาม 2 รายการ ดังปรากฏใน ตารางที่ 2 แสดงที่มาของตัวชี้วัด

Table 2 The following table shows the origin of indicators.

ลำดับที่	ตัวชี้วัด	ตัวชี้วัดทั้งหมดที่นำมาใช้ในงานวิจัย	ตัวชี้วัดที่เหมาะสมที่ได้จากการตอบ
1	กรมชลประทานใช้อยู่ในปัจจุบัน	29	18
	- หน่วยงานนำมาใช้ (E_1)	15	7
	- หน่วยงานไม่ได้นำมาใช้ (E_2)	14	11
2	นำมาจากการพิจารณาเอกสาร	51	12
	- จากหน่วยงานอื่น (O)	31	11
	- จากเอกสารวิชาการของต่างประเทศ (R)	20	1
3	จากข้อเสนอแนะของผู้ตอบแบบสอบถาม	2	2
	- จากบุคลากรภายในหน่วยงาน (L)	2	2
		82	32

Annotation E_1, E_2 = Existing ,O = Other ,L = literature ,R = respondent

โดยตัวชี้วัดที่มีคะแนนความเหมาะสมที่เลือกนำมาใช้ในการวิจัย นั้น นำมาจากตัวชี้วัดที่กรมชลประทาน ใช้อยู่ในปัจจุบัน 18รายการ ตัวชี้วัดที่นำมาจากหน่วยงานอื่น 11รายการ ตัวชี้วัดที่นำมาจากเอกสารของต่างประเทศ 1 รายการ และตัวชี้วัดที่ได้จากข้อเสนอแนะของผู้ตอบแบบสอบถาม 2 รายการ

คะแนนที่ได้จากการใช้ดัชนีชี้วัดความสำเร็จที่ได้จากการพัฒนาในโครงการกรณีศึกษา พบว่าในมิติที่ 1 ด้านประสิทธิผลตามยุทธศาสตร์ ค่าคะแนนที่ได้แสดงให้เห็นว่าต้องพัฒนาการปฏิบัติงานในด้านของ การก่อสร้างให้แล้วเสร็จตามแผน อีกทั้งด้านความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม ในมิติที่ 2 ด้านคุณภาพการให้บริการ ค่าคะแนนที่ได้แสดงให้เห็นว่าต้องพัฒนาการปฏิบัติงานในด้านของคุณภาพการให้บริการ ที่ต้องคำนึงถึงความพึงพอใจของผู้รับบริการด้วย ในมิติที่ 3 ด้านประสิทธิภาพของการปฏิบัติราชการ ค่าคะแนนที่ได้แสดงให้เห็นว่าต้องพัฒนาการปฏิบัติงานในเรื่องของ ผลการศึกษา และการพัฒนาสนับสนุนการดำเนินงาน ของการพัฒนาแหล่งน้ำ และในมิติที่ 4 ด้านการพัฒนาองค์กร ค่าคะแนนที่ได้แสดงให้เห็นว่าต้องพัฒนาการปฏิบัติงานในเรื่องของ ระบบการรายงานผลให้มีประสิทธิภาพ อีกทั้งการพัฒนาระบบเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อใช้ในการบริหารจัดการพัฒนาแหล่งน้ำให้มีประสิทธิภาพ

ผลจากการเปรียบเทียบระหว่างดัชนีชี้วัดเดิมที่สำนักพัฒนาแหล่งน้ำฯ ใช้อยู่ในปัจจุบันกับดัชนีชี้วัดใหม่ที่ได้จากงานวิจัยรายละเอียดดังปรากฏในตารางที่ 3 สรุปดัชนีวัดความสำเร็จการพัฒนาแหล่งน้ำ

Table 3 Summary index measuring the success of water resources development.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(6)	
				ดัชนีชี้วัดเดิม		ดัชนีชี้วัดใหม่	
ลำดับที่ตัวชี้วัด	ตัวชี้วัด	ที่มาของตัวชี้วัด	คะแนนที่ได้ (%)	(5.1) ค่าน้ำหนัก (%)	(5.2) คะแนนสุทธิ	(6.1) ค่าน้ำหนัก (%)	(6.2) คะแนนสุทธิ
มิติที่ 1. ด้านประสิทธิผลตามยุทธศาสตร์			55.71	28.12	1.266	30.00	1.052
เป้าประสงค์ : มีปริมาณน้ำเก็บกักและพื้นที่ชลประทานเพิ่มขึ้น			80.00	28.12	1.266	21.30	0.885
1.1	จำนวนปริมาณน้ำเก็บกักที่เพิ่มขึ้น	E_1	100.00	14.06	0.703	9.00	0.450
1.2	จำนวนพื้นที่ชลประทานที่เพิ่มขึ้น	E_1	100.00	14.06	0.563	6.30	0.315
1.3	จำนวนแหล่งน้ำเพื่อชุมชนที่เพิ่มขึ้น	E_2	40.00			6.00	0.120
เป้าประสงค์ : การก่อสร้างแล้วเสร็จตามแผน			32.00			3.00	0.048
1.4	ร้อยละความสำเร็จในการก่อสร้างระบบชลประทานเทียบกับแผน	L	32.00			3.00	0.048
เป้าประสงค์ : รับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม			39.33			5.70	0.119
1.5	ร้อยละของผลผลิตหลักทางการเกษตรที่เพิ่มขึ้น	O	50.00			3.00	0.075
1.6	ร้อยละที่เพิ่มขึ้นของกลุ่มเกษตรกรผู้ใช้น้ำ	O	20.00			1.50	0.015
1.7	มูลค่าของผลผลิตทางการเกษตรต่อหน่วยพื้นที่ชลประทาน	R	48.00			1.20	0.029
มิติที่ 2. ด้านคุณภาพการให้บริการ			74.33	4.69	0.235	23.00	0.864
เป้าประสงค์ : ผู้รับบริการมีความพึงพอใจ			77.20	4.69	0.235	21.50	0.819
2.1	ร้อยละของอาคารชลประทานที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน	E_2	70.00			8.05	0.282
2.2	ร้อยละของผู้ใช้น้ำในเขตพื้นที่การชลประทานที่พอใจต่อการบริหารจัดการน้ำ	E_2	80.00			5.05	0.202
2.3	ร้อยละความพึงพอใจของประชาชนต่อโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ	O	96.00			3.65	0.175
2.4	ระดับความพึงพอใจของประชาชนต่อความคุ้มค่าจากการพัฒนาแหล่งน้ำ	O	60.00			2.95	0.089
2.5	ระดับความพึงพอใจต่อคุณภาพของโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ	O	80.00			1.80	0.072
2.6	ระดับความพึงพอใจของผู้รับบริการ	N		4.69	0.235		
เป้าประสงค์ : ผู้รับบริการมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ			60.00			1.50	0.045
2.7	ร้อยละของประชาชนที่มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ	O	60.00			1.50	0.045

หมายเหตุ ค่าภายในช่องที่ 5.2 (คะแนนสุทธิ) คือค่าที่ได้จากผลคูณของช่องที่ 5.1 (ค่าน้ำหนัก(%)) กับช่องที่ 4 (คะแนนที่ได้ (%))หารด้วย 20 เนื่องจากคะแนนเต็มเท่ากับ 5 แล้วนำค่าที่ได้มาหารด้วย 100 อีกครั้ง ส่วนค่าภายในช่องที่ 6.2 (คะแนนสุทธิ) คือค่าที่ได้จากผลคูณของช่องที่ 6.1 (ค่าน้ำหนัก(%)) กับช่องที่ 4 (คะแนนที่ได้ (%)) หารด้วย 20 แล้วนำค่าที่ได้มาหารด้วย 100 อีกครั้ง โดยค่าในช่องที่ 4 (คะแนนที่ได้ (%)) เป็นค่าคะแนนดิบของดัชนีวัดความสำเร็จการพัฒนาแหล่งน้ำที่ได้จากการวัดของหน่วยงาน

Table 3 Summary index measuring the success of water resources development. (to)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(6)	
				ดัชนีชี้วัดเดิม		ดัชนีชี้วัดใหม่	
ตัวชี้วัดที่	ตัวชี้วัด	ที่มาของตัวชี้วัด	คะแนนที่ได้จากแบบสอบถาม (%)	(5.1) ค่าน้ำหนัก (%)	(5.2) คะแนนสุทธิ	(6.1) ค่าน้ำหนัก (%)	(6.2) คะแนนสุทธิ
มิติที่ 3. ด้านประสิทธิภาพของการปฏิบัติราชการ			62.16	46.89	1.310	24.00	0.697
เป้าประสงค์ : การก่อสร้างซ่อมแซมและปรับปรุง แล้วเสร็จตามแผนงาน			38.00	9.38	0.280	9.12	0.174
3.1	ร้อยละของการก่อสร้างอาคารชลประทานที่แล้วเสร็จตามแผน	E_1	40.00	4.69	0.133	5.04	0.101
3.2	ร้อยละของการซ่อมแซม และปรับปรุงอาคารชลประทานที่แล้วเสร็จตามแผน	E_2	36.00			4.08	0.073
3.3	ร้อยละของงานการก่อสร้างงานป้องกันและบรรเทาอุทกภัยที่แล้วเสร็จตามแผน	N		4.69	0.148		
เป้าประสงค์ : การเตรียมความพร้อมก่อนการก่อสร้างเป็นไปตามแผนงาน			80.00	9.38	0.338	7.68	0.300
3.4	ร้อยละของโครงการที่สามารถเตรียมความพร้อมในการก่อสร้างแล้วเสร็จตามแผน	N		4.69	0.103		
3.5	จำนวนโครงการศึกษา วิจัยและพัฒนาที่แล้วเสร็จ	N		4.69	0.235		
3.6	ร้อยละของงานศึกษาโครงการที่แล้วเสร็จตามแผน	E_2	60.00			3.12	0.094
3.7	ร้อยละของงานสำรวจที่แล้วเสร็จตามแผน	E_2	100.00			2.40	0.120
3.8	ร้อยละของงานออกแบบที่แล้วเสร็จตามแผน	E_2	80.00			2.16	0.086
เป้าประสงค์ : มีผลการศึกษา และการพัฒนาสนับสนุนการดำเนินงาน			60.00			3.60	0.101
3.9	ประสิทธิภาพการชลประทานในฤดูแล้ง	E_2	50.00			1.20	0.030
3.10	จำนวนโครงการศึกษา วิจัยและพัฒนาที่แล้วเสร็จ	E_1	20.00			0.96	0.010
3.11	อัตราส่วนค่าใช้จ่ายการปรับปรุงบำรุงรักษาอาคารชลประทานรายปี	L	80.00			0.72	0.029
3.12	ประสิทธิภาพการส่งน้ำของระบบชลประทาน	R	90.00			0.72	0.032
เป้าประสงค์ : ประชาชน ชุมชน และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีส่วนร่วม			63.33	9.38	0.281	3.60	0.122
3.13	จำนวนครั้งที่ดำเนินการจัดมวลชนสัมพันธ์ในระยะการวางโครงการก่อนการก่อสร้าง และระหว่างก่อสร้าง	E_1	100.00	4.69	0.235	1.44	0.072
3.14	ร้อยละของพื้นที่ชลประทานที่มีการตั้งกลุ่มเกษตรกรผู้ใช้น้ำ	E_2	50.00			1.44	0.036
3.15	ร้อยละของการจัดทำรายงานได้ถูกต้องและทันเวลาที่กำหนด	N		4.69	0.047		
3.16	ร้อยละความสำเร็จของประสิทธิภาพการบริหารจัดการเครื่องจักรกล	O	40.00			0.72	0.014
เป้าประสงค์ : ระบบการบริหารงานมีประสิทธิภาพ				18.75	0.410		
3.17	ร้อยละของการเบิกจ่ายงบประมาณรายจ่ายงบลงทุน	N		18.75	0.410		

Table 3 Summary index measuring the success of water resources development. (to)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(6)	
ตัวชี้วัดที่	ตัวชี้วัด	ที่มาของตัวชี้วัด	คะแนนที่ได้จากแบบสอบถาม (%)	ดัชนีชี้วัดเดิม		ดัชนีชี้วัดใหม่	
				(5.1) ค่าน้ำหนัก (%)	(5.2) คะแนนสุทธิ	(6.1) ค่าน้ำหนัก (%)	(6.2) คะแนนสุทธิ
มิติที่ 4. ด้านการพัฒนาองค์กร			66.57	20.32	0.599	23.00	0.730
เป้าประสงค์ : ระบบการบริหารงานมีประสิทธิภาพ			64.00			12.65	0.388
4.1	ร้อยละของการเบิกจ่ายงบประมาณรายจ่ายงบลงทุน	E_2	48.00			7.36	0.177
4.2	ผลคะแนนจาก PMQA	E_2	80.00			5.29	0.212
เป้าประสงค์ : บุคลากรมีสมรรถนะและขวัญกำลังใจในการทำงาน			84.66	10.94	0.172	6.21	0.256
4.3	ร้อยละของระดับความพึงพอใจของบุคลากรต่อการปฏิบัติงาน	E_1	74.00	4.69	0.047	3.45	0.128
4.4	ร้อยละเฉลี่ยของข้าราชการกรมที่ผ่านการประเมินสมรรถนะในระดับที่องค์กรคาดหวัง	N		1.56	0.078		
4.5	ค่าเฉลี่ยคะแนนการตรวจประเมินการจัดการความรู้) KMA)	N		4.69	0.047		
4.6	ร้อยละของบุคลากรในหน่วย งานมีสมรรถนะตามเกณฑ์ที่กำหนด	O	100.00			1.84	0.092
4.7	ระดับความเข้าใจของพนักงานในการส่งเสริมการมีส่วนร่วมกับประชาชน	O	80.00			0.92	0.037
เป้าประสงค์ : ระบบการรายงานผลมีประสิทธิภาพ			42.00			4.14	0.085
4.8	ร้อยละความก้าวหน้าของการพัฒนาระบบเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อใช้ในการบริหารจัดการพัฒนาแหล่งน้ำและจัดการน้ำ	E_2	40.00			2.99	0.060
4.9	ร้อยละของการรายงานผลการดำเนินงานที่ถูกต้องและทันตามกำหนด	O	44.00			1.15	0.025
เป้าประสงค์ :มีระบบฐานข้อมูลและเทคโนโลยีสารสนเทศที่เหมาะสม				9.38	0.427		
4.10	ร้อยละของการบันทึกข้อมูลในระบบติดตามOnline	N		4.69	0.192		
4.11	ระดับคุณภาพเว็บไซต์ของสำนัก/กอง	N		4.69	0.235		
	รวมทั้งสิ้น				3.410		3.343

หากพิจารณาผลเปรียบเทียบดัชนีวัดความสำเร็จ ฯ พบว่าค่าคะแนนน้ำหนักของดัชนีวัด เดิม แต่ละมิติมีค่าแตกต่างกัน โดยที่ค่าคะแนนน้ำหนักของมิติที่ 2 ด้านคุณภาพการให้บริการมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้องมีการปรับปรุงการปฏิบัติงานด้าน คุณภาพการให้บริการและมิติที่ 3 ด้านประสิทธิภาพของการปฏิบัติราชการมีค่าสูงที่สุด ซึ่งค่าน้ำหนักคะแนนในมิตินี้มีค่าสูงกว่ามิติอื่น เนื่องจากมีการให้น้ำหนักความสำคัญกับตัวชี้วัด ในมิตินี้มากกว่าตัวชี้วัดอื่นๆ และเมื่อพิจารณาค่าคะแนนน้ำหนักของดัชนีวัดความสำเร็จที่ พัฒนาจากการวิจัยจะพบว่าค่าคะแนนน้ำหนักในแต่ละมิติมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้นำเอาตัวชี้วัดที่ สะท้อนถึงความต้องการของ ผู้มีความเกี่ยวข้องจากภายนอก และเกษตรกรเข้ามาประกอบในการวัด ผล เพื่อให้สามารถนำไปสู่ความสำเร็จในการพัฒนาแหล่งน้ำ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาความเชื่อมโยงระหว่างเหตุ และผลของแต่ละด้านของการบริหาร เพื่อการพัฒนาดัชนีวัดความสำเร็จให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์หลักในการวิจัยซึ่งตัวชี้วัดที่เลือกนำมาใช้จะต้องสามารถระบุได้ถึงปัจจัยที่จะนำไปสู่ความสำเร็จของการบริหารงานในแต่ละด้าน ตั้งแต่การวางแผนงาน การควบคุมงาน การก่อสร้างและให้บริการ ตลอดจนผลการให้บริการ

ผลจากการวิจัยการพัฒนาดัชนีวัดความสำเร็จ ฯ พบว่าบุคลากร และเกษตรกรส่วนใหญ่ตระหนักถึงความสำคัญในการพัฒนาแหล่งน้ำ และต้องการรับรู้ถึงผลสัมฤทธิ์ในการบริหารงาน เพื่อให้สาม ารถนำข้อมูลไปใช้ในการพัฒนาการปฏิ บัติงาน การให้บริการในการพั ฒนาแหล่งน้ำต่อไป ส่งผลให้คะแนนโดยรวมของการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของดัชนีวัดความสำเร็จในทุกๆ ด้าน มีความเหมาะสม มีความน่าเชื่อถือในการใช้วัดผลการปฏิบัติงาน และสามารถนำดัชนีวัดความสำเร็จการพัฒนาแหล่งน้ำ ที่ ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยไปประยุก ต์ใช้ในการวัดผลการปฏิบัติงานในปัจจุบันได้

เอกสารอ้างอิง

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย .2545. **ดัชนีวัดความสำเร็จในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของ อบต.** รายงานฉบับสมบูรณ์ (ธันวาคม 2545) : 1-194

สิริเลิศ เมฆไพบูลย์ .2531. **การประเมินผลกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารงาน.** วารสารข้าราชการ . 33 (กุมภาพันธ์ 2531) : 15 - 22

ผสุ เดชะรินทร์ .2545. **เส้นทางจากลยุทธ์สู่การปฏิบัติด้วย** Balanced Scorecard **และ**Key Performance Indicators.โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : 1- 138

สุนทราวาสิทธ์ คุมมานนท์ .2544. **การเปรียบเทียบหลักการบาลานซ์สคอร์การ์ดกับตัววัดผลการปฏิบัติงานที่ใช้อยู่ กรณีศึกษา.(มหาชน) บริษัทไทยโพลีอะคริลิค จำกัด** : การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โสภณ แซ่ด่าน .2543. **เครื่องมือวัดผลการดำเนินงาน กรณีศึกษาบริษัทสยามบรรจุภัณฑ์ราชบุรี (1989) จำกัด**: การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kaplan, S. and P, Norton. 1996. **Balanced Scorecard.** Harvard Business PressMassachusetts, U.S.A.

Posayanant, S. 2007. **KEY PERFORMANCE INDICATORS FOR LOCAL GOVERNMENT INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT: THE CASE OF SUB-DISTRICT (TAMBON) ADMINISTRATIVE ORGANIZATION.** Asian Institute of Technology : 1- 263

Knowledge Synthesis Report . 2001.**International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage**

การวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องคูลลิ่งโมดูลสำหรับตู้ควบคุม

An Analysis and Improvement Performance of the Cooling Module for Controller Cabinet

ยุทธภูมิ โพธิ์อาศัย[1*] และ สมพงษ์ พิเชฐภิญโญ[1]

Yuttapoom Phoarsai[1*] and Sompong Pichetpinyo[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างห้องทดสอบเพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องคูลลิ่งโมดูลต้นแบบ จากการทดสอบที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าคอยล์เย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูลมีค่าประมาณ 35 องศาเซลเซียสและ 40 % Rh และที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนเข้าคอยล์ร้อนมีค่าประมาณ 35 และ 40 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่า ค่าเฉลี่ยของความสามารถการทำความเย็นที่วัดจากค่าอัตราส่วนความร้อนที่ปั่นให้กับห้องควบคุมสภาวะภายในต่อค่าอัตราส่วนความร้อนสัมผัสของคอยล์เย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูล และ การวัดด้วยวิธีไซโครเมตริกของอากาศมีค่าประมาณ 2614.02 และ 1993.09 บีทียูต่อชั่วโมง ตามลำดับ และเมื่อทำการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนพัดลมคอยล์เย็นให้มีอัตราไหลเพิ่มขึ้นจาก 207.75 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงเป็น 258.55 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงพบว่า ที่สภาวะการทดสอบดังกล่าว ค่าของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ยที่วัดทั้งสองวิธีมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4.87 % และ 18.06 % ตามลำดับ

ABSTRACT

This research designed and built the calorimeter room testing in order to analyze and improve the cooling module efficiency.The experimental result at 35 °C DB , 40% Rh of the return air at cooling coil, and 35°C and 40°C DB of the return air at condenser, found that , the average of cooling capacity , as measured by the ratio of the heat input into the indoor room to the cooling coil sensible heat ratio of the cooling module and the psychrometric measurement method of air which flows through the cooling coils of the cooling module about 2614.02 Btu/hr and 1993.09 Btu/hr ,respectively. When improved the performance by increasing evaporator fan flow rate from 207.75 m^3/h to 258.55 m^3/h found that, at the test conditions as mentioned above , the energy efficiency ratio average, as measured by both method, increased approximately 4.87% and 18.06% ,respectively.

Key Words: cooling module, calorimeter testing room, improvement performance

* Corresponding author; e-mail address: **kokokla1989@gmail.com**

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

คูลลิ่งโมดูลเป็นเครื่องปรับอากาศที่ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าหรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ภายในตู้ควบคุม เช่น อุปกรณ์ทางไฟฟ้าหรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ภายในตู้ควบคุมชนิด PLC(Programmable Logic Controller) และตู้ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าชนิด MDB(Main Distribution Board) เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ทางไฟฟ้าหรือชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นส่วนสำคัญในการควบคุมและประมวลผลการทำงานโดยปกติแล้วภายในตู้ควบคุมจะมีความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์ทางไฟฟ้าหรือชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะตู้ควบคุมที่ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีความร้อนที่เกิดจากเครื่องจักรภายในโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยที่มีลักษณะร้อนชื้น ทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในและภายนอกตู้ควบคุมมีค่าสูง ส่งผลทำให้อุปกรณ์ทางไฟฟ้าหรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ภายในตู้ควบคุมเกิดความเสียหาย ทำให้การทำงานของเครื่องจักรเกิดการหยุดชะงักและเสียหายได้ ดังนั้นผู้ประกอบการโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จึงได้นำเครื่องคูลลิ่งโมดูลมาใช้ในการระบายความร้อนให้กับตู้ควบคุมของเครื่องจักร ทำให้สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เนื่องจากผู้ผลิตเครื่องคูลลิ่งโมดูลที่ทำการผลิตตามเครื่องต้นแบบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศโดยไม่มีการวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพนั้น จะทำให้ผู้ผลิตไม่สามารถวิเคราะห์และพัฒนาประสิทธิภาพได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องคูลลิ่งโมดูลต้นแบบโดยออกแบบและสร้างห้องทดสอบ (Calorimeter testing room) สำหรับทดสอบประสิทธิภาพและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องคูลลิ่งโมดูลให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบและสร้างห้องทดสอบประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างห้องทดสอบแบบวัดความร้อนแบบสอบเทียบ (Calibrated Calorimeter Room) เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพและวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ซึ่งโครงสร้างและส่วนประกอบของห้องทดสอบประสิทธิภาพพอสังเขปแสดงใน Figure 1

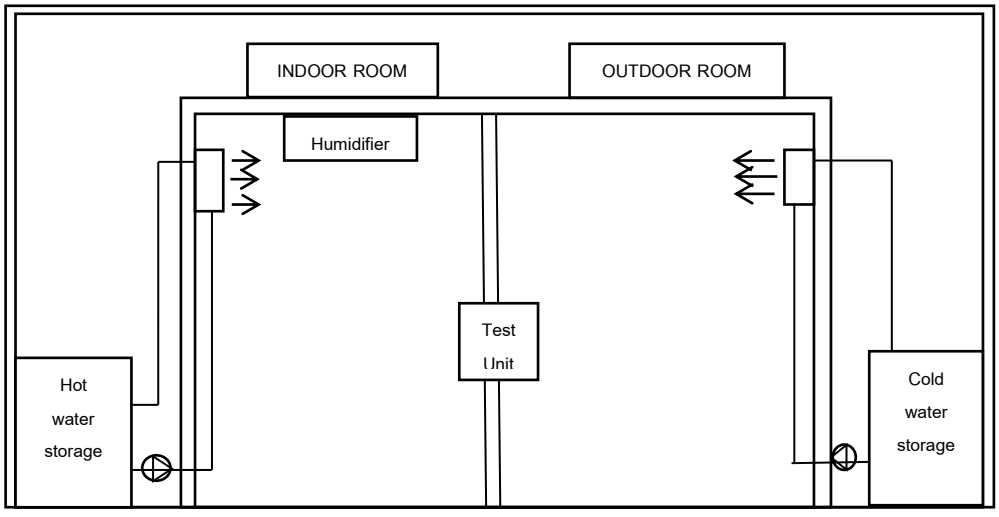


Figure 1 Schematic of The Calibrated Calorimeter Testing Room for Cooling Module

อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

1). ชุดคอยล์น้ำร้อนและน้ำเย็น

2). ถังน้ำขนาด 100 ลิตร

3). ปั๊มน้ำ ยี่ห้อ Grundfos ช่วงอัตราการไหล 0.15-13.0 GPM สามารถใช้กับอุณหภูมิและความดันสูงสุดที่ 190 °F ,150 Psi ตามลำดับ 151.4 Pulse/gallon

4). Temperature sensor ชนิด Pt-100 สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง –200 ถึง 400° C และค่าความผิดพลาด ± 0.55° C

5). ฮีตเตอร์

6). ชุดเครื่องทำน้ำเย็นขนาดทำความเย็น

7). Digital PID Temperature Controller , Sensitivity 0.5 mSec ความละเอียด 0.25% of F.S. 4 digit

8). Digital indicating with alarm 0.2% of F.S.

9). Digital frequency meter with alarm

10). อุปกรณ์วัดความชื้น)Humidity sensor) ± 0.2 %Rh (10-90 %Rh)

11). อุปกรณ์เพิ่มความชื้น)Humidifier)

12). Multifunction meter

13). เครื่องคูลลิ่งโมดูลที่ใช้ในการทดสอบรุ่น 2700 Btu/hr

14). เครื่องมือวัดความเร็ว Turbine Anemometer

การดำเนินการทดสอบ

เนื่องจากอุณหภูมิภายในตู้ควบคุมหรือพื้นที่ปรับอากาศมีค่าสูงกว่าพื้นที่ปรับอากาศของผู้อยู่อาศัย ดังนั้น การทดสอบจะทำการทดสอบที่สภาวะการใช้งานจริง ซึ่งอุณหภูมิของการกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าคอยล์เย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูลมีค่า 35°C, 40%Rh และอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนเข้าคอนเดนเซอร์ของเครื่องคูลลิ่งโมดูลมีค่าประมาณ 35°C และ 40°C ตามลำดับ เมื่อสภาวะของห้องควบคุมอากาศภายในและภายนอกอยู่ในสภาวะคงที่ตามสภาวะที่กำหนดไว้แล้ว ทำการบันทึกค่าต่าง ๆ ตามเซนเซอร์ที่ได้ติดตั้ง ซึ่งค่าที่ได้จากเซนเซอร์จะถูกแปลงสัญญาณด้วย Transmitter ให้อยู่ในสัญญาณมาตรฐาน โดยเซนเซอร์ทั้งหมดจะส่งสัญญาณไปที่หน้าจอแสดงผลและส่งสัญญาณแบบ 4-20 mA ยกเว้น Pt – 100 จะส่งสัญญาณเป็นแบบความต้านทาน จากนั้นสัญญาณจากหน้าจอแสดงผลจะถูกส่งเป็นสัญญาณ RS-485 เข้าสู่เครื่องแปลงสัญญาณกลายเป็น RS-232 (USB) เชื่อมเข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อเก็บข้อมูล (data logger) ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การหาความสามารถการทำความเย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูล สามารถหาได้ 2 วิธีคือ 1.หาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนสัมผัสของคอยล์เย็นต่อค่าอัตราส่วนความร้อนสัมผัสของคอยล์เย็น(Coil sensible heat ratio) ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 1

$$\dot{Q}_{Cooling} = \frac{\dot{Q}_{Sensible}}{CSHR} \quad (1)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{Cooling}$ คือความสามารถการทำความเย็นของคอยล์เย็น, Btu/hr

$\dot{Q}_{Sensible}$ คือปริมาณความร้อนสัมผัสของคอยล์เย็น, Btu/hr

CSHR คืออัตราส่วนความร้อนสัมผัสของคอยล์เย็น

ปริมาณความร้อนสัมผัสของคูลลิ่งคอยล์ของเครื่องคูลลิ่งโมดูลสามารถหาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนภายในห้องควบคุมสภาวะอากาศภายในดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 2

$$\dot{Q}_{Sensible} = \dot{m}_w C_{pw} \Delta T \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{Q}_{Sensible}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนของน้ำร้อน,kW

$\dot{m}_w$ คืออัตราการไหลของน้ำ,kg/s

C_{pw} คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ kJ/kg°K

ΔT คือผลต่างอุณหภูมิของน้ำเข้าออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน °C

ใน Figure 2 แสดงกระบวนการทำความเย็นและลดความชื้นบนไซโครเมตริกชาร์ท ซึ่งค่าอัตราส่วนความร้อนสัมผัสของคอยล์เย็น (CSHR)สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความร้อนสัมผัสของอากาศต่อผลรวมความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของอากาศ หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3

$$CSHR = \frac{\Delta h_{sen}}{\Delta h_{total}} \quad (3)$$

โดยที่ CSHR คืออัตราส่วนความร้อนสัมผัสของคอยล์เย็น

Δh_{sen} คือผลต่างของค่าความร้อนสัมผัสของอากาศ (kJ/kg)

Δh_{total} คือผลต่างของค่าความร้อนของอากาศรวม(kJ/kg)

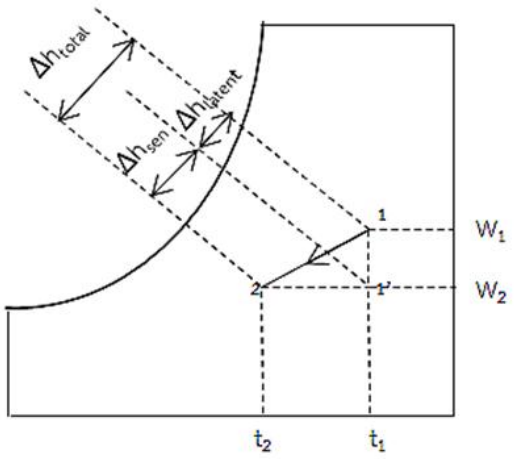


Figure 2 Cooling Dehumidification Process on Psychrometric Chart

สำหรับการหาความสามารถการทำความเย็นด้วยวิธีที่2 หาด้วยวิธีไซโครเมตริกด้านอากาศเย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูล ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 4

$$\dot{Q}_{Cooling} = \dot{m}_{air} \Delta h_{total} \quad (4)$$

ค่าความร้อนของอากาศหรือค่าเอนทรัลปีของอากาศสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5

$$h = 1.006t + W(2501 + 1.805t) \quad (5)$$

โดยที่ h คือค่าความร้อนของอากาศ,kJ/kg

t คืออุณหภูมิแห้งของอากาศ,°C

W คือความชื้นจำเพาะของอากาศ,kg_w/kg_a

$\dot{m}_{air}$ คืออัตราการไหลของอากาศ,kg/s

ความชื้นจำเพาะของอากาศสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6

$$W = \frac{0.622P_W}{(P - P_W)} \quad (6)$$

โดยที่ P_w คือความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ,Pa

P คือความดันบรรยากาศ,Pa

W คืออัตราส่วนความชื้นของอากาศ,kg_w/kg_a

ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 7

$$P_W = \frac{\%RH}{100} x P_{ws} \quad (7)$$

ความดันไอน้ำอิ่มตัวในอากาศ (P_{ws}) ช่วงอุณหภูมิแห้งของอากาศ 0-200 °C สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 8

$$P_{ws} = e^{(\frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln T)} \quad (8)$$

โดยที่ C_1 =- 5.8002206x10^3, C_2 = 1.3914993 , C_3 =- 4.8640239x10^{-2} , C_4 = 4.1764768x10^{-5}

C_5 =-1.4452093x10^{-8} ,C_6 = 6.5459673 , T คืออุณหภูมิแห้งของอากาศ °K

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio, EER) เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของเครื่องคูลลิ่งโมดูลซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 9

$$EER = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{Power\ Input} \quad (9)$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองเบื้องต้น

ในการวิเคราะห์หรือคำนวณปริมาณความสามารถการทำความเย็นในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาความสามารถการทำความเย็นด้วย 2 วิธีคือ 1.คำนวณจากค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนของน้ำร้อนที่ป้อนให้กับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนในห้องควบคุมสภาวะอากาศภายใน (sensible heat) ต่อค่าอัตราส่วนความร้อนสัมผัส (CSHR) และ 2.คำนวณด้วยวิธีไซโครเมตริกของอากาศที่ผ่านคอยล์เย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูล ซึ่งผลการทดสอบแสดงใน Table 1 และ 2

Table 1 The Comparison Results at 35 °C Outdoor air temperature of Method 1 and Method 2

Outdoor Temperature at 35 °C			
Method	Cooling load,Btu/hr	Watt	EER,Btu/(Watt.hr)
1	2680.80	669.98	4.00
2	2547.23	669.98	3.80
Average	2614.017		3.90

Table 2 The Comparison Results at 40 °C Outdoor air temperature of Method 1 and Method 2

Outdoor Temperature at 40 °C			
Method	Cooling load,Btu/hr	Watt	EER,Btu/(Watt.hr)
1	1940.90	691.71	2.81
2	2045.28	691.71	2.96
Average	1993.088		2.88

ผลของการปรับปรุงประสิทธิภาพ

ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องคูลลิ่งโมดูล ได้ทำการเพิ่มความสามารถการทำความเย็นด้วยการเพิ่มอัตราไหลของพัดลมคอยล์เย็นเพื่อเพิ่มความสามารถการทำความเย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูล จากการทดสอบที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนเข้าคอนเดนเซอร์ของเครื่องคูลลิ่งโมดูลมีค่าประมาณ 35 °C และ 40°C ตามลำดับ พบว่า เมื่อเปลี่ยนพัดลมคอยล์เย็นให้มีอัตราไหลเพิ่มขึ้นจาก 207.75 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เป็น 258.55 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ความสามารถการทำความเย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูลเฉลี่ยจากการวัดทั้งสองวิธีมีค่าเพิ่มขึ้น 6.29 % และ 22.22 % ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 3 และค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพ

พลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4.87 % และ 18.06% ที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนเข้าคอนเดนเซอร์ของเครื่องคูลลิ่งโมดูลมีค่าประมาณ 35 °C และ40°C ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 4

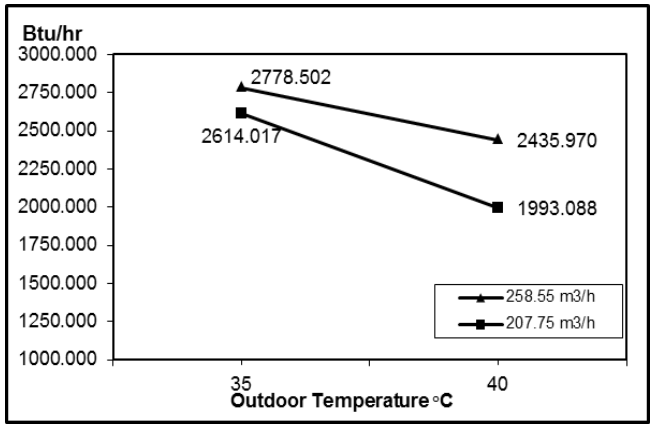
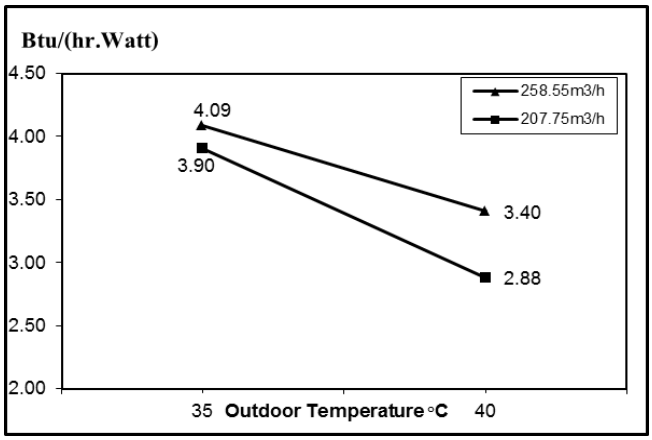


Figure 3 The Comparison of The Cooling Capacity Before and After Improvement



\

Figure 4 The Comparison of The Energy Efficiency Ratio Before and After Improvement

สรุป

ในการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องคูลลิ่งโมดูลต้นแบบ ที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าคอยล์เย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูลมีค่าประมาณ 35 องศาเซลเซียสและ 40 % Rh และที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนเข้าคอยล์ร้อนมีค่าประมาณ 35 และ 40 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่าความสามารถการทำความเย็นเฉลี่ยที่วัดจากค่าอัตราส่วนความร้อนที่ป้อนให้กับห้องควบคุมสภาวะภายในต่อค่าอัตราส่วนความร้อนสัมผัสของคอยล์เย็นของเครื่องคูลลิ่งโมดูลกับการวัดด้วยวิธีไซโครเมตริกของอากาศมีค่าประมาณ 2614.02 และ 1993.09 บีทียูต่อชั่วโมง ตามลำดับ และเมื่อทำการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนพัดลมคอยล์เย็นให้มีอัตราไหลเพิ่มขึ้นจาก 207.75 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงเป็น 258.55 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่า ที่สภาวะการทดสอบดังกล่าว ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่วัดจากทั้งสองวิธีมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 4.87 % และ 18.06 % ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท ไพรมัส จำกัด เป็นอย่างสูงที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

มนต์ศักดิ พิมสาร และ อักษา ทองคำ. 2556. การศึกษาการเพิ่มอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่** 27.

ธนวรา ทองล้วน. 2547. **การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยอากาศโดยการพ่นน้ำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ASHRAE. 2001. **ASHRAE Fundamentals Handbook SI**. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, .Atlanta.

ASHRAE. 2009. **ASHRAE Standard 16-1983 - Method of Testing for Rating Room Air Conditioners and Packaged Terminal Air Conditioners**. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, Atlanta.

Nattaporn, C. and K. Tanongkiat K. 2015. Study On Thermal Performance of R-32 Air-Conditioner. **Engineering Journal Chaing Mai University** 22(2): 38-46.

การเลือกชนิดตัวกลางที่เหมาะสมสำหรับประเภทตัวกลาง ฟองน้ำยางพารา ฟองน้ำโพลิยูรีเทน และฟองน้ำเมลามีนในการเลี้ยงเชื้ออนาม็อกแบบไบโอฟิล์ม

Suitable medium selection for latex foam, polyurethane foam and melamine foam of biofilm Anammox cultures

แพรวพรรณ มณีวรรณ [1*] พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์[1] และ ศิริพร ลาภเกียรติถาวร[2]

Praewpan Maneewan[1*] Pongsak Noophan[1] and Siriporn Larpkiattaworn[2]

บทคัดย่อ

การเลือกชนิดตัวกลางที่ความเหมาะสมสำหรับประเภทตัวกลาง ฟองน้ำยางพารา ฟองน้ำโพลิยูรีเทน และฟองน้ำเมลามีนในการเลี้ยงเชื้ออนาม็อกแบบไบโอฟิล์มโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบซีเควนซิ่งแบทช์ ผลการศึกษาพบว่าลักษณะทางกายภาพของฟองน้ำแต่ละชนิดส่งผลต่อการยึดเกาะของจุลินทรีย์อนาม็อก ฟองน้ำที่มีพื้นผิวมากที่สุดคือยางพารา ชนิด P5181 และ P5182 เชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกมีการเกาะบนพื้นผิวแบบกระจายตัว ส่วนฟองน้ำโพลียูริเทนและฟองน้ำเมลามีนพบว่ามีพื้นผิวน้อยกว่า แต่มีลักษณะพื้นผิวเป็นเส้นใยทำให้จุลินทรีย์อนาม็อกสร้างเส้นใยเพื่อเชื่อมจุลินทรีย์อนาม็อกให้สามารถอยู่รวมตัวเป็นก้อน และเชื่อมต่อระหว่างพื้นผิวฟองน้ำและจุลินทรีย์อนาม็อกเข้าด้วยกัน

ABSTRACT

Selection of suitable medium for latex foam; polyurethane foam and melamine foam for biofilm Anammox cultures by using anaerobic sequencing batch reactor (SBR). The results were showed that the physical characteristics of foam were affected adhesion on anammox cultures. The highest surface area of media was latex foams type P5181 and P5182; anammox cultures were spreaded on surface. The structure of polyurethane foam and melamine foam were cross linked and have lower surface than latex foam; filamentous bacteria could make the anammox cultures more closely and firmly and linked surface together .

Key Words: Anammox granule, media, latex foam

* Corresponding author; e-mail address: praew.manee@gmail.com

[1]ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ตำบลคลองห้า อำเภอคลองคลวง ปทุมธานี 12120

[2]Thailand institute of scientific and technological research, Tambon Khlong Ha, Ampphor Khlong Luang, Pathum Thani 1212

คำนำ

ผลผลิตยางพาราไทยปี 2557 อยู่ที่ระดับ 4.0 ล้านตัน นับเป็นครั้งแรกที่ไทยมีผลผลิตยางลดลงจากปีก่อนร้อยละ 3.2 เนื่องจากสภาพภูมิอากาศแห้งแล้ง และสถานการณ์ความไม่สงบและการประท้วง ยางพาราจึงอยู่ในช่วงขาลง ไม่จูงใจเกษตรกรผลิตยาง (กฤษณี พิสิฐศุภกุล, 2558) ทำให้รัฐบาลจัดประชุมชี้แจงแนวทางบริหารจัดการยางพารา เพื่อให้เกิดการแก้ไขปัญหายางพาราเพื่อจัดแผนพัฒนายางฝ่าวิกฤตราคาตกต่ำสู่ความยั่งยืน (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2558) ส่งเสริมให้เกษตรกรภาคตะวันออกเฉียงเหนือปลูกยางพาราเพื่อเพิ่มผลผลิตมากยิ่งขึ้น รวมทั้งสนับสนุนผลผลิตแปรรูปยางทุกชนิด เช่นการนำยางพารามาปรับปรุงถนน อุปกรณ์ทางการแพทย์ สายยาง ตุ๊กตายางเพื่อใช้ในทางการแพทย์ ถุงมือเคลือบยาง และอุปกรณ์รถยนต์ต่างๆเพื่อเป็นการกระตุ้นให้เกิดการใช้ยางในประเทศได้อีกทางหนึ่ง (คมชัดลึก, 2558) ทำให้สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยสนใจผลิตผลิตภัณฑ์แปรรูปฟองน้ำจากยางพารา เพื่อนำมาใช้งานในด้านผลิตภัณฑ์แปรรูป รวมถึงเพื่อศึกษาถึงการนำมาใช้เป็นตัวกลางในการบำบัดน้ำเสียที่มีธาตุไนโตรเจนสูงด้วยกระบวนการอนาม็อก (Anaerobic Ammonium Oxidation, Anammox) (Murder et al., 1995) กระบวนการนี้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการเติมสารอินทรีย์และลดค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศเพื่อเปลี่ยนไนไตร์เป็นไนเตรทได้ด้วย แต่ข้อเสียของกระบวนการอนาม็อกคือ จุลินทรีย์กลุ่มนี้มีอัตราการเติบโตช้ามาก จึงต้องใช้ระยะเวลานานในการเริ่มเดินระบบ (พงศ์ศักดิ์, 2554; Jetten et al., 1997) ดังนั้นการเก็บตะกอนในระบบจึงมีความสำคัญควรมีการผสมตะกอนทั้งใหม่และเก่าเข้ากัน ระบบที่นิยมมาใช้ในการศึกษากระบวนการอนาม็อกค่อนข้างมากคือระบบเอสบีอาร์ (Sequening Batch Reactor, SBR) (Strous et al., 1998; Fux, 2003) และไบโอฟิล์ม (Biofilm Reactor) (Depena-Mora al.,2014)

จากการศึกษาผลของการยึดเกาะของเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกแบบเติบโตแขวนลอยและแบบมีตัวกลางยึดเกาะโดยทำการหยุดการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ระบบเป็นเวลา 34 วัน พบว่าเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มอนาม็อกแบบเติบโตแขวนลอยตายทั้งหมด ส่วนเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มอนาม็อกซ์แบบมีตัวกลางยึดเกาะเชื้อยังมีชีวิตรอด และการศึกษาการเกาะตัวของจุลินทรีย์อนาม็อกบนตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ โพลียูริเทน โพลีเอไมด์ และโพลีไตรรีน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลางทั้งสามชนิดมีค่ามากกว่า 98% แต่จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเชื้ออนาม็อกสามารถยึดเกาะกับตัวกลางได้ทั้งสามชนิด โดยตัวกลางโพลียูรีเทนเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกสามารถยึดเกาะตัวได้มากที่สุด (ทิพวรรณ, 2013) ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาการยึดเกาะของตัวกลาง 3 ชนิดที่มีลักษณะเป็นฟองน้ำ คือ ฟองน้ำยางพาราที่คิดค้นจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ตำบลคลองห้า จังหวัดปทุมธานี ฟองน้ำโพลียูรีเทน และ ฟองน้ำเมลามีนจากประเทศญี่ปุ่น เพื่อหาความเหมาะสมของชนิดตัวกลางที่ดีที่สุดในการใช้เลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อก

อุปกรณ์และวิธีการ

ตัวอย่างฟองน้ำยางพารา ฟองน้ำโฟลียูริเทน และฟองน้ำเมลามีน

ตัดฟองน้ำยางพารา ฟองน้ำโพลียูริเทน และฟองน้ำเมลามีนตัวอย่างเป็นสี่เหลี่ยม กว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร และสูง 1.5 เซนติเมตร จดบันทึกเปรียบเทียบลักษณะภายนอกจากการสังเกตเบื้องต้น เพื่อ

นำไปทดสอบประสิทธิภาพจากการทนแสง และตัดตัดฟองน้ำยางพารา ฟองน้ำโพลียูริเทน และฟองน้ำเมลามีน ตัวอย่างเป็นสี่เหลี่ยม กว้าง 1 เซนติเมตร ยาง 1 เซนติเมตร และสูง 1 เซนติเมตรเพื่อนำไปเขย่ารวมกับเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกในขวดเซรั่มและนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ทดสอบประสิทธิภาพจากการทนแสงจากหลอดรังสียูวีและหลอดรังสีอินฟราเรดเพื่อคัดเลือกฟองน้ำยางพาราตัวอย่าง

ศึกษาผลการทนจากแสงโดยใช้หลอดรังสียูวี และหลอดรังสีอินฟราเรด เนื่องจากปัจจัยหลักในการเสื่อมคุณภาพของยางพาราคือ รังสียูวีจากดวงอาทิตย์ และความร้อน จึงทำการทดลองโดยจำลองการเสื่อมคุณภาพของฟองน้ำยางพาราในสภาวะโดนแสงยูวีและความร้อนและคัดเลือกฟองน้ำยางพาราประดิษฐ์ที่ดีที่สุดมา 2 รหัสเพื่อนำมาใช้เป็นตัวกลาง* ทำการทดสอบโดยวางฟองน้ำยางพารา P4181 P4182 P5181 P5182 และ P6201 ภายใต้ชุดทดสอบหลอดรังสียูวี และชุดทดสอบหลอดรังสีอินฟราเรด กำหนดอุณหภูมิภายใต้ชุดทดสอบ 39 องศาเซลเซียส ทดสอบและเก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง เป็นเวลา 3 เดือน โดยชุดทดสอบรังสียูวีตัวอย่างฟองน้ำยางพาราอยู่ในลักษณะแห้ง และชุดทดสอบรังสีอินฟราเรดตัวอย่างฟองน้ำยางพาราอยู่ในบีกเกอร์ที่ใส่น้ำ คัดเลือกฟองน้ำยางพาราที่ดีที่สุด 2 ตัวอย่าง เพื่อนำไปทำการทดลองต่อไป

* หมายเหตุ ฟองน้ำยางพาราประดิษฐ์แต่ละรหัสมีความแตกต่างกันที่ส่วนผสมและเปอร์เซ็นต์ของยางพารา

ทดสอบประสิทธิภาพการยึดเกาะของเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ศึกษาประสิทธิภาพการยึดเกาะของเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ฟองน้ำยางพารา (ผลจากการทดลองที่1) ฟองน้ำโพลียูรีเทน และฟองน้ำเมลามีน ใช้วิธีการเขย่าเชื้อจุลิทรีย์อนาม็อกปริมาตร 50 มิลลิลิตรกับตัวอย่างฟองน้ำขนาด 1 ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน โดยเชื้อจุลินทรีย์มีค่าตะกอนแขวนลอยระเหย (MLVSS) เท่ากับ 1,020 มิลลิกรัมต่อลิตร กำหนดให้อยู่ในสภาวะไร้แสง ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที และผ่านก๊าซอาร์กอนและคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อศึกษาความเหมาะสมของชนิดตัวกลางฟองน้ำยางพารา ฟองน้ำโพลียูรีเทน และฟองน้ำเมลามีนเพื่อใช้ในการเลี้ยงเชื้ออนาม็อกแบบไบโอฟิล์ม

ผลและวิจารณ์การทดลอง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพจากการทนแสงจากหลอดรังสียูวีและหลอดรังสีอินฟราเรดเพื่อคัดเลือกฟองน้ำยางพาราตัวอย่าง

จากการศึกษาประสิทธิภาพจากการทนแสงจากหลอดรังสียูวีเพื่อคัดเลือกฟองน้ำยางพารา P4181 P4182 P5181 P5182 และ P6201 โดยเก็บผลการทดสอบจากภาพถ่ายและจากการสังเกตและเปรียบเทียบ พบว่า ฟองน้ำยางพาราชนิด P5181 P5182 และP6201 เนื้อผิวฟองน้ำมีความหนามีเนื้อละเอียดและมีความสม่ำเสมอกว่าฟองน้ำยางพาราชนิดอื่น เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ยางพาราในเนื้อฟองน้ำสูง เมื่อนำมาทดสอบด้วยหลอดรังสียูวีพบว่า ฟองน้ำยางพาราทุกชนิดเมื่อโดยรังสียูวีในระยะเวลา 1 เดือนแรก จะมีการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง และเริ่มกรอบ และจะเริ่มเสื่อมสภาพโดยการหลุดเป็นผงเมื่อบีบในเดือนที่ 3 จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า

ฟองน้ำยางพาราชนิด P5181 และ P5182 มีความคงตัวที่สุดและเสียรูปทรงน้อยที่สุด (figure 1) จึงได้เลือกฟองน้ำยางพารา P5181 และP5182 มาใช้เป็นตัวกลางในการเลี้ยงเชื้ออนามัยก

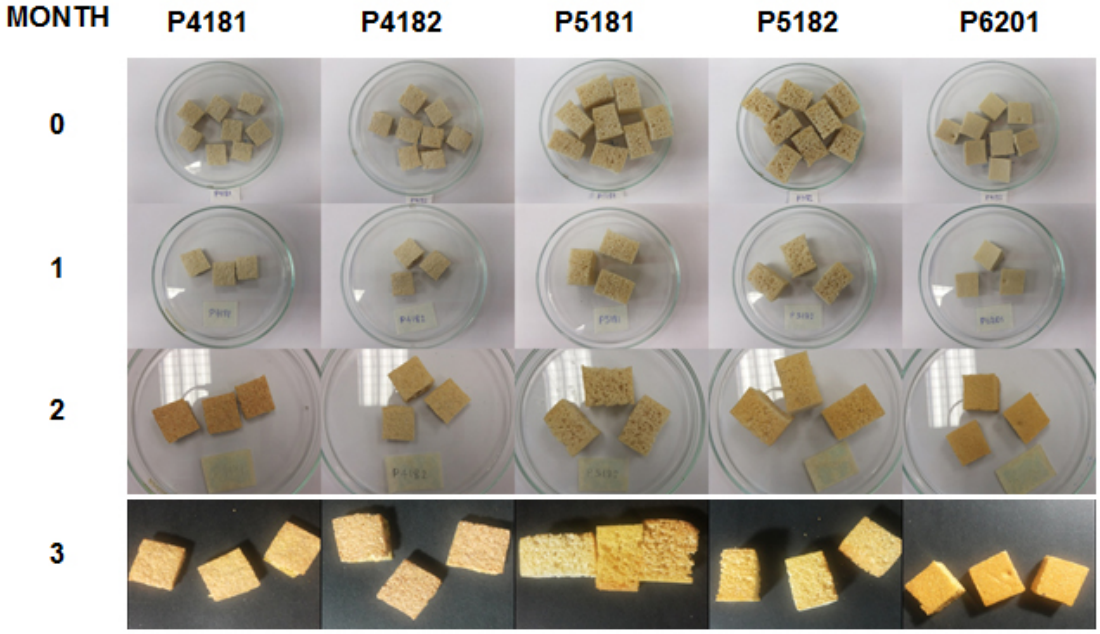


Figure 1 Result of latex foam P4181 P4182 P5181 P5182 and P6201 under UV lamp in 3 month

จากการศึกษาประสิทธิภาพจากการทนความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดเพื่อคัดเลือกฟองน้ำยางพารา P4181 P4182 P5181 P5182 และ P6201 โดยเก็บผลการทดสอบจากภาพถ่ายและจากการสังเกตและเปรียบเทียบพบว่า ฟองน้ำยางพาราทุกชนิดให้ผลที่คล้ายกัน คือไม่เกิดการเสียรูปทรง ยังมีความยืดหยุ่นเมื่อบีบจะคืนตัวกลับมา และเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลอมเหลืองอ่อนเป็นสีขาวเมื่อเข้าระยะเวลาเดือนที่ 3 (figure 2)

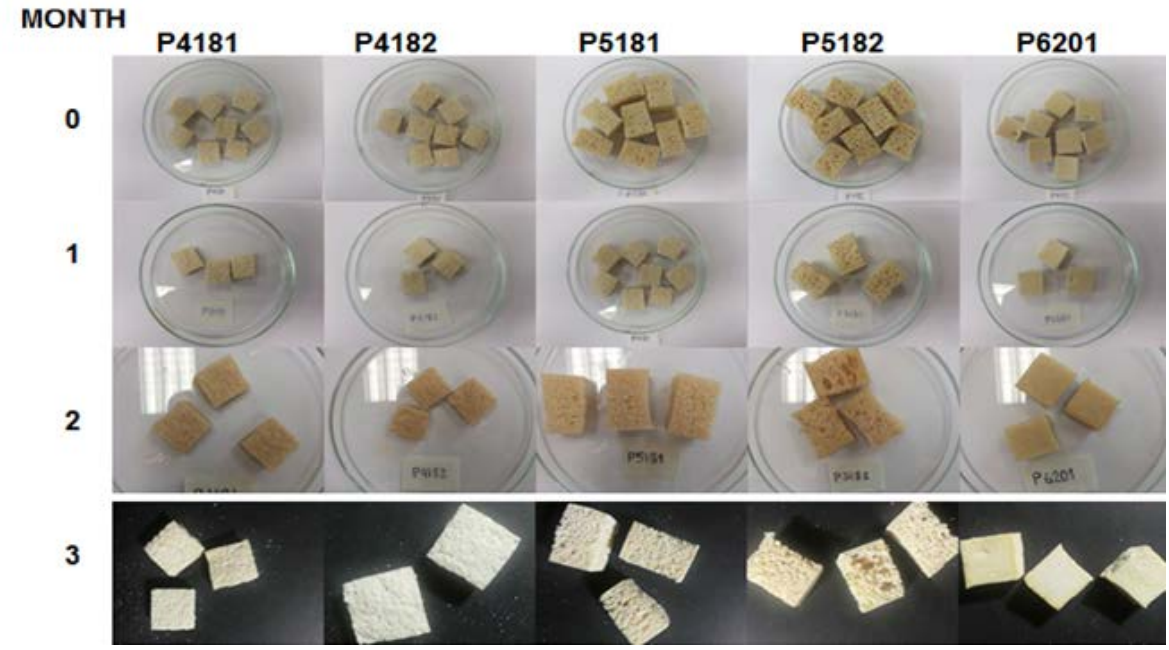


Figure 2 Result of latex foam P4181 P4182 P5181 P5182 and P6201 under IR lamp in 3 month

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการยึดเกาะของเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการศึกษาประสิทธิภาพการยึดเกาะของเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกจากฟองน้ำยางพารา ฟองน้ำโพลียูริเทน และฟองน้ำเมลามีน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในสภาวะไร้แสง ที่อุณหภูมิห้อง และผ่านแก๊สอาร์กอน – คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน พบว่าเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกเริ่มเกาะอยู่ที่ฟองน้ำทุกชนิดในระยะเวลา 7 วัน โดยผลจากลักษณะทางกายภาพของฟองน้ำแต่ละชนิดส่งผลต่อการยึดเกาะของจุลินทรีย์อนาม็อก คือ ฟองน้ำยางพารา P5181 และ P5182 มีพื้นผิวฟองน้ำที่มากที่สุดส่งผลให้เชื้ออนาม็อกเกาะบนพื้นผิวฟองน้ำมีการกระจายตัวสูงที่สุด (figure 3: A-D) (figure 4: A-D) ที่ระยะเวลา 14วัน และ 21 วัน พบเชื้ออนาม็อกเกาะตัวบนฟองน้ำหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามลำดับ (figure 3: 7-14) (figure 4: 7-14) ส่วนฟองน้ำโพลียูริเทนมีพื้นผิวฟองน้ำปานกลางมีโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (figure 5: A-D) จุลินทรีย์อนาม็อกเกาะที่พื้นผิวของฟองน้ำ มีการตัวกระจายกันตามพื้นที่ จุลินทรีย์อนาม็อกมีการยึดเกาะโดยมีการสร้างเส้นใย (polymeric chain) เพื่อเชื่อมจุลินทรีย์อนาม็อกให้อยู่รวมตัวเป็นก้อน (figure 5: 7-14) และฟองน้ำเมลามีนมีโครงสร้างคล้ายเส้นใยถักทอกันเป็นระเบียบและมีพื้นผิวฟองน้ำน้อยที่สุด ทำให้จุลินทรีย์อนาม็อกยึดเกาะฟองน้ำโดยสร้างเส้นใยจำนวนมากขึ้นมาเชื่อมต่อระหว่างตัวจุลินทรีย์ให้เป็นกลุ่มก้อนและเชื่อมต่อพื้นผิวของฟองน้ำกับตัวจุลินทรีย์อนาม็อกเข้าด้วยกัน (figure 6: A-D) (figure 6: 7-14) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fan et al.(20014) ในส่วนของปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกที่ยึดเกาะในฟองน้ำแต่ละชนิด สามารถหาได้จากการวิเคราะห์หาค่าแอมโมเนียไคเนติก ไนไตรท์ไคเนติก และไนเตรทไคเนติก โดยใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานอเมริกา (APHA/AWWA/WEF, 2005) ของตัวอย่างน้ำเข้าและน้ำออกจากถังปฏิกรณ์ เทียบเป็นประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนของตัวกลางทั้งสามชนิด ซึ่งกำลังอยู่ในระหว่างการทดลอง

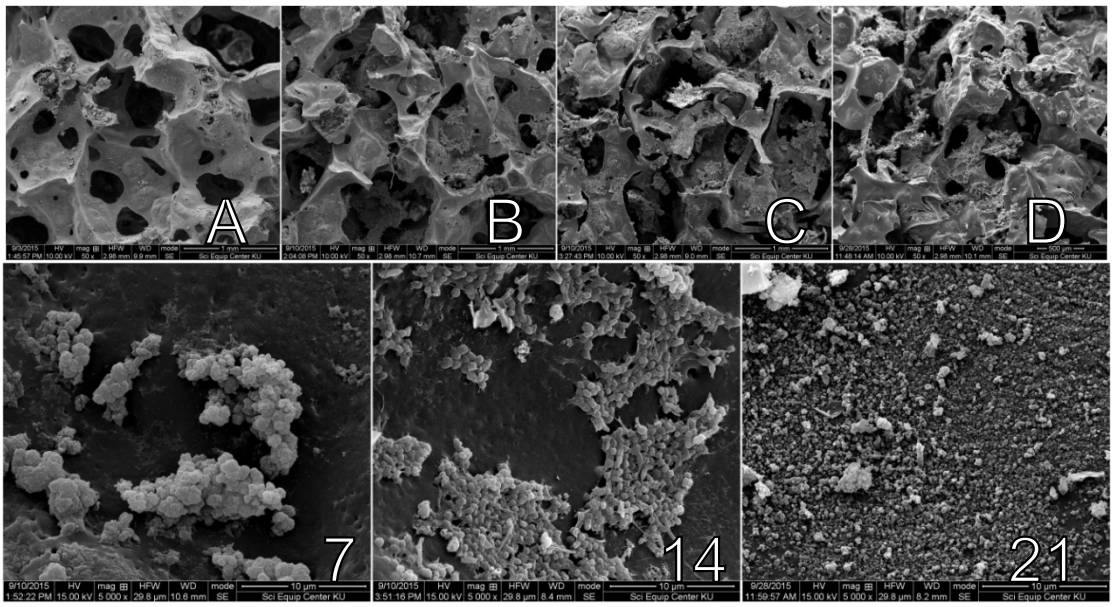


Figure 3 The SEM images of latex foam P5181: the sectional SEM images of anammox granules : blank –anammox (A) : 7days (B) : 14 days (C) :21 days (D) at mag.50x and the internal SEM images of anammox granules at mag 5,000x : 7 days (7) :14 days (14) and 21 days (21)

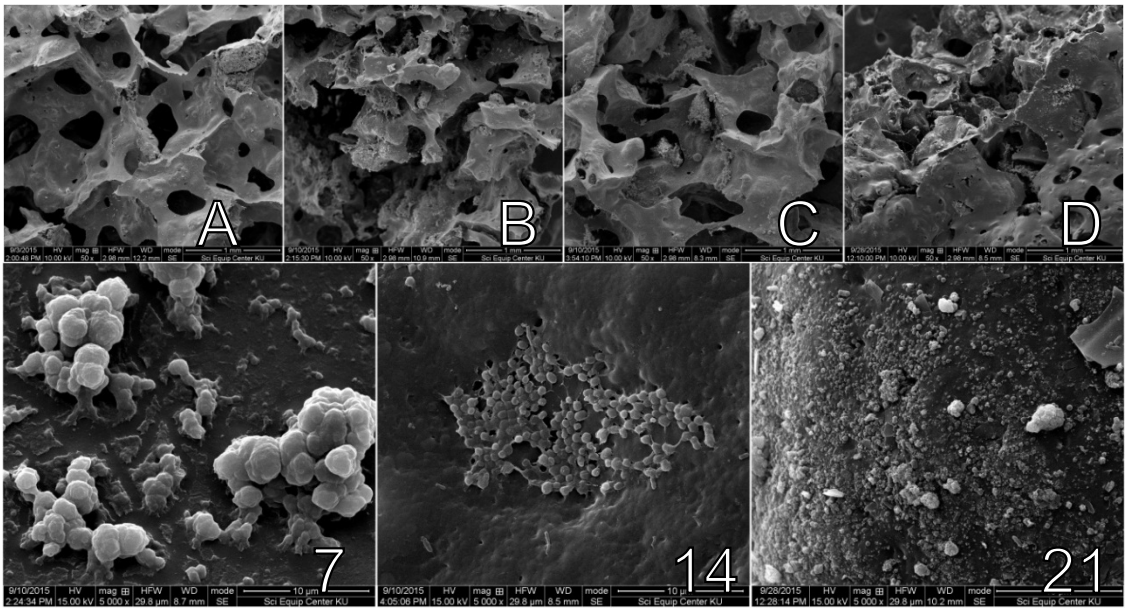


Figure 4 The SEM images of latex foam P5182: the sectional SEM images of anammox granules : blank –anammox (A) : 7days (B) : 14 days (C) :21 days (D) at mag.50x and the internal SEM images of anammox granules at mag 5,000x : 7 days (7) :14 days (14) and 21 days (21)

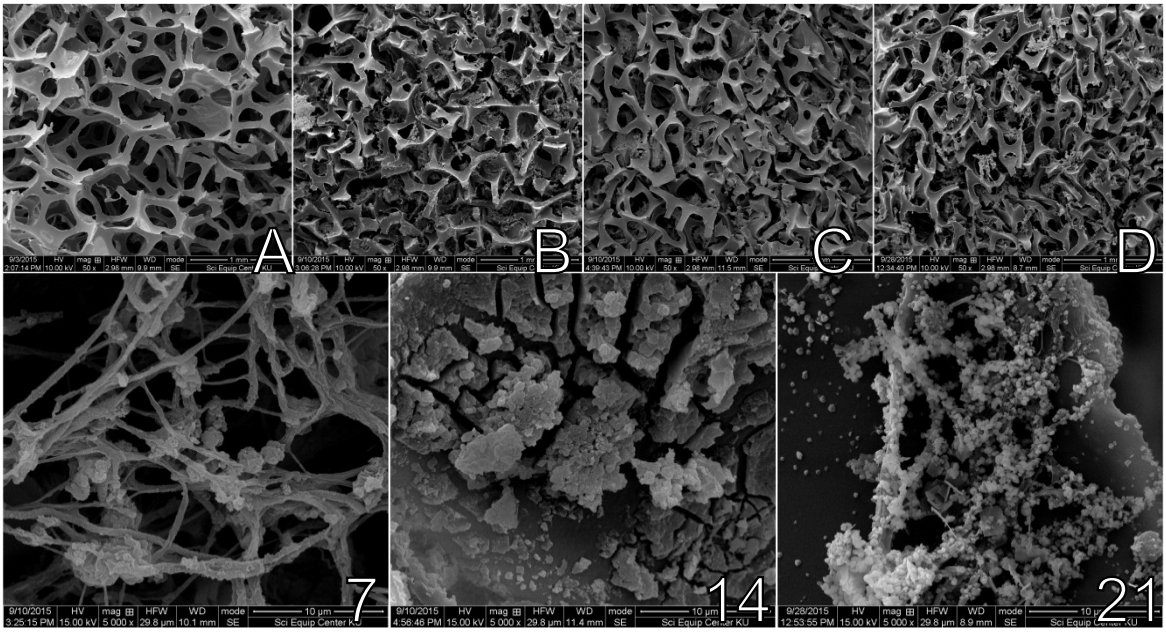


Figure 5 The SEM images polyurethane foam: the sectional SEM images of anammox granules : blank –anammox (A) : 7days (B) : 14 days (C) :21 days (D) at mag.50x and the internal SEM images of anammox granules at mag 5,000x : 7 days (7) :14 days (14) and 21 days (21)

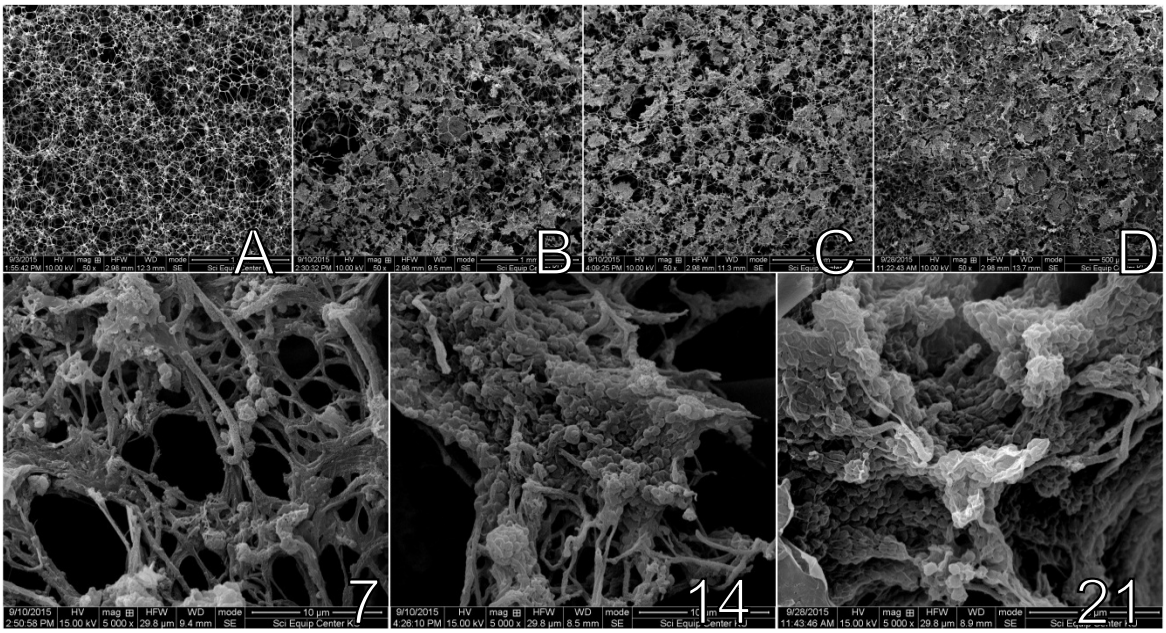


Figure 6 The SEM images Melamine foam: the sectional SEM images of anammox granules : blank – anammox (A) : 7days (B) : 14 days (C) :21 days (D) at mag.50x and the internal SEM images of anammox granules at mag 5,000x : 7 days (7) :14 days (14) and 21 days (21)

สรุป

จากการคัดเลือกฟองน้ำยางพาราที่ประดิษฐ์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย พบว่าฟองน้ำยางพารา P5181 และ P5182 มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวกลางยึดเกาะให้เชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกมากที่สุด เนื่องจากลักษณะฟองน้ำมีความหนามีเนื้อละเอียดและมีความสม่ำเสมอกว่าฟองน้ำยางพาราชนิดอื่น เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ยางพาราในเนื้อฟองน้ำสูง และมีความคงตัวที่สุดและเสียรูปทรงน้อยที่สุดเมื่อทดสอบกับหลอดรังสียูวี และหลอดรังสีอินฟราเรด และผลจากการทดสอบจากการศึกษาประสิทธิภาพการยึดเกาะของเชื้อจุลินทรีย์อนาม็อกจากฟองน้ำยางพารา ฟองน้ำโพลียูริเทน และฟองน้ำเมลามีน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะทางกายภาพของฟองน้ำแต่ละชนิดส่งผลต่อการยึดเกาะของจุลินทรีย์อนาม็อก โดยฟองน้ำที่มีพื้นผิวฟองน้ำมากที่สุดคือ ฟองน้ำยางพารา P5181 และ P5182 เชื้อจุลินทรีย์จะมีการเกาะบนพื้นผิวแบบกระจายตัว ส่วนฟองน้ำ โพลียูริเทน และฟองน้ำเมลามีน พบว่ามีพื้นผิวน้อยกว่า และมีลักษณะพื้นผิวแบบเส้นใย ทำให้จุลินทรีย์อนาม็อกสร้างเส้นใย (polymeric chain) เพื่อเชื่อมจุลินทรีย์อนาม็อกให้อยู่รวมตัวเป็นก้อน และเชื่อมต่อระหว่างพื้นผิวฟองน้ำเพื่อเชื่อมตัวจุลินทรีย์ให้สามารถยึดเกาะในฟองน้ำได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (ว.ว.) จังหวัดปทุมธานี ที่ให้ฟองน้ำยางพาราสูตรคิดค้นเพื่อมาเป็นตัวอย่างในการทำงานวิจัย และห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ให้สถานที่ทดสอบงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2558. **กระทรวงเกษตรฯ ประชุมชี้แจงแนวทางการบริหารจัดการยางพารา รอบการผลิต ปี 58/59**. แหล่งที่มา: http://www.moac.go.th/ewt_news.php?nid=14864, 7 ธันวาคม 2558

กฤษณี พิสิฐศุภกุล. 2558. **สถานการณ์ยางพาราปี 2557 และแนวโน้มปี 2558**. สำนักงานภาคใต้, ธนาคารแห่งประเทศไทย.

คมชัดลึก. 2558. **แผนพัฒนายางทั้งระบบปี58/59'ฝ่าวิกฤติราคาตกต่ำสู่ความยั่งยืน'**. แหล่งที่มา: http://www.komchadluek.net/detail/20150414/204682.html, 7 ธันวาคม 2558

ทิพวรรณ บุญวัตน์. 2556. **ผลของการกวนและชนิดของตัวกลางต่อการเกิดไบโอฟิล์มของเชื้ออนาม็อกและต่อประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์ซีเควนซิ่งแบตช์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์. 2554 ระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กและบำบัดแบบติดกับที่. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

APHA, AWWA and WEF. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA

Depenna-Mora, A. B. Arrojo, J.L. Campos, A. Mosquera-Corral and R. Mendez. 2004.

Improvement of the settling properties of Anammox sludge in an SBR. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** 79: 1417 – 1420.

Gao, F., Zhang, H., Yang, F., Li, H. and Zhang, R. 2014. The effects of zero-valent iron (ZVI) and ferroferric oxide (Fe3O4) onanammox activity and granulation in anaerobic continuously stirred tank reactors (CSTR). **Process Biochemistry**.49: 10970-1978.

Jetten, M.S.M., S. Hom and M.C.M. van Loosdrecht. 1997. Towards a more sustainable municipal wastewater treatment system. **Water Sci. Technol.** 35 (9): 171-180.

Mulder A., A.A. van de Graaf, L.A. Robertson and J.G. Kuenen. 1995. Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. **FEMS Microbiol. Ecol.** 16: 177-184.

Strous, M., J.J. Heijnen, J.G. Kuenen and M.S.M. Jetten. 1998. The sequenceing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium- oxidizing microorganisms. **Appl Microbiol. Biotechnol.** 50: 589-596.

ระบบควบคุมและติดตามสภาพแวดล้อมเพื่อการเกษตรผ่านสมาร์ทดีไวซ์

Environment Monitoring And Control For Agriculture Via Smart Device

ศศิมาภรณ์ มงคลพิทักษ์[1*] และ ทวีพล ซื่อสัตย์[1]

Sasimaporn Mongkolpitak[1*] and Taweepol Suesut[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบควบคุมอัตโนมัติที่ติดตามสภาพแวดล้อมเพื่อการเกษตรผ่านสมาร์ทดีไวซ์ โดยมีตัวควบคุมแบบตรรกะที่โปรแกรมได้ (PLC) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมซึ่งรับข้อมูลจากตัวเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น และยังทำหน้าที่เป็นเว็ปเซริฟเวอร์แบบฝังตัวสำหรับใช้ในการปฏิบัติงานระยะไกล และวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีผู้ปฏิบัติอยู่บริเวณพื้นที่เพาะปลูก นอกจากนี้ผู้ปฏิบัติงานยังสามารถใช้สมาร์ทดีไวซ์ผ่านกล้องไอพีเพื่อตรวจสอบความผิดปกติ และการเจริญเติบโตของพืชได้อีกด้วย ในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการควบคุมระบบ 2 วิธี คือ วิธีแรกเป็นการควบคุมตามเวลา ซึ่งโปรแกรมการรดน้ำทุกเช้าเย็น วิธีที่สองเป็นการรดน้ำตามสภาวะของอุณหภูมิและความชื้น จากผลการทดลองพบว่าวิธีที่สองให้ผลการประหยัดน้ำได้ดีกว่าและการเจริญเติบโตของพืชดีกว่า และได้มีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ในงานวิจัยนี้ช่วยประหยัดทั้งแรงงาน และทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ABSTRACT

This paper presents the automatic system for control and monitoring the agricultural plant via smart device. The programmable logic controller (PLC) is the controller getting data from the temperature sensor and the humidity sensor and also works as an embedded web server for remote operation and data analysis that the human is not necessary to operate at the vegetable plant. Moreover, the operator can use the smart device to observe the vegetable plant via the IP camera in order to check the abnormal event as well as the growing of the plant. The experiment setup has been compared between two control algorithms. The first algorithm is time-based control system which the watering is done every morning and evening. The second algorithm is condition-based control system which the watering is depended on temperature and humidity condition. The experiment result is shown that the second algorithm can be saved the water and better growing rate and the economic analysis was discussed. This work can be saved the labor cost and resources efficiently.

Key Words : PLC, IP camera, smart device

*Corresponding author ; e-mail address : **sasimaporn.m@gmail.com**

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ, 10520

[1]Department of Instrumentation and Control Engineering , Faculty of Engineering , King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok , 10520

คำนำ

ปัจจุบันการเกษตรกรรมมีความต้องการเพิ่มคุณภาพ และปริมาณของผลผลิต จึงมีการนำเสนอผลงานที่จะช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว คือ การตรวจสอบสภาพของสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่เพาะปลูก เพื่อทำการปรับปรุงและแก้ไขสภาพต่างๆ ของสิ่งแวดล้อม เช่น การเพิ่มน้ำให้กับพืชโดยการตรวจสอบความชื้นภายในดิน ซึ่งมีการใช้งานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมาประยุกต์ใช้งานเพื่อตรวจสอบสภาพของสิ่งแวดล้อม (ภาคภูมิ มโนยุทธ, มัลลิกา อุณหวิวรรธน์, วรรณรัช สันติอมรทัต. 2010) สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำ Smart Device (Tab Phone, Tablet, Smart Phone, PC, Notebook) มาพัฒนาใช้กับระบบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับในปัจจุบันมีการใช้งาน Smart Device อย่างแพร่หลาย หากนำอุปกรณ์เหล่านี้มาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบสภาพของสิ่งแวดล้อมจะทำให้ง่ายต่อการเข้าถึงและสะดวกในการใช้งานในทุกสถานที่

การปลูกพืชผลการเกษตรที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกล เกษตรกรอาจไม่สามารถไปดูแลได้ตลอดเวลา จึงได้มีการนำระบบและอุปกรณ์มาประยุกต์ใช้ดูแลพืชผลทางการเกษตร เพื่อติดตามสภาพแวดล้อม และดูแลผลผลิตให้ได้ผลตามที่คาดหวัง และสามารถทดแทนการจ้างแรงงานคนในการดูแลพืชผลที่เพาะปลูก ซึ่งในสภาวะปัจจุบันค่าแรงได้พุ่งสูงขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำเวลาที่จะต้องเข้าไปดูแลพืชผลที่เพาะปลูกส่วนนี้ ไปใช้ในกิจกรรมส่วนอื่นเพื่อเป็นรายได้เสริม หรืออาจจะทำให้เกษตรกรสามารถเพาะปลูกพืชผลได้ในจำนวนที่มากขึ้น

งานวิจัยระบบควบคุม และติดตามสภาพแวดล้อมเพื่อการเกษตรผ่าน Smart Device ได้ถูกออกแบบมาให้มีความยืดหยุ่นต่อการนำไปใช้งาน คือสามารถนำไปใช้เป็นตัวควบคุมในการรดน้ำพืช ได้ทุกพื้นที่ และยังสามารถติดตามสภาพแวดล้อมของบริเวณพื้นที่แปลงเพาะปลูก เพื่อนำข้อมูลสภาพอากาศที่ได้มาช่วยวิเคราะห์การให้น้ำพืชในขณะนั้นอีกด้วย งานวิจัยนี้จะทำการติดตามสภาพอากาศ และดูแลผลผลิตซึ่งเป็นการเฝ้าติดตามผลผ่านหน้าเว็บไซต์โดยที่ PLC จะควบคุมระบบ จัดเก็บข้อมูลจากตัวเซนเซอร์จากนั้นวิเคราะห์การทำงานของระบบแล้วแสดงค่าที่วัดได้ขึ้นบนหน้าเว็บไซต์ทำให้ผู้ใช้เห็นข้อมูลของสภาพแวดล้อมในเวลาขณะนั้น ในการดำเนินวิจัยครั้งนี้จะควบคุมผ่าน Smart Device และสามารถเฝ้าดูสถานการณ์รอบๆ แปลงเพาะปลูกได้ตลอดเวลาด้วยการดูผ่าน IP Camera ซึ่งสะดวกต่อการเฝ้าติดตามผลในระยะไกลโดยที่เกษตรกรไม่จำเป็นต้องอยู่ในพื้นที่แปลงเพาะปลูก

อุปกรณ์และวิธีการ

การออกแบบระบบ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์การวัดค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้นของอากาศและดิน รวมไปถึงสภาพอากาศในพื้นที่เพาะปลูก เพื่อตรวจสอบ ติดตามสภาพแวดล้อมและการทำงานต่างๆ ของระบบ ผ่านทางหน้าเว็บไซต์ โดยใช้ PLC ในการควบคุมสั่งการระบบ การตรวจวัดความชื้นในดินรวมไปถึงอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณแปลงเพาะปลูกข้อมูลเหล่านี้จะสามารถนำมาวิเคราะห์การให้น้ำแก่พืช เมื่อระดับความชื้นในดินอยู่ในระดับต่ำกว่าที่ตั้งค่าไว้ ระบบจะสั่งให้น้ำกับพืชโดยจะแสดงข้อมูลที่ระบบตรวจวัด ควบคุมการทำงาน ผ่านหน้าเว็บไซต์บนอุปกรณ์ Smart Device และสามารถติดตามติดตามสถานการณ์ในบริเวณแปลงทดลองได้โดยผ่าน IP Camera เปรียบเทียบกับแปลงเพาะปลูกที่ตั้งเวลาในการรดน้ำให้กับพืช โดยไม่มีการตรวจสอบและติดตามสภาพแวดล้อมบริเวณแปลง กำหนดให้ในแต่ละวันมีการรดน้ำคือ ช่วงเช้า และช่วงเย็น

อุปกรณ์และการประมวลผล

ในการทดลองนั้นทางผู้วิจัยเลือกใช้ PLC ของ Unitronics รุ่น V350-35-T2 ซึ่งมี สัญญาณขาเข้า (input) ได้แก่ เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor), ทรานสมิตเตอร์วัดความชื้น และอุณหภูมิ (Humidity & Temperature Transmitter), โฟลว์สวิตช์ (Flow Switch) และสัญญาณขาออก (output) ได้แก่ โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) การตรวจวัดปริมาณความชื้นในดินจะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดค่าความชื้นในดิน การวัดค่าความชื้นในดินนั้นจะนำเอาแท่งอิเล็กโทรด (Electrode)ปักลงไปในดินที่ต้องการวัดซึ่งก็จะสามารถอ่านค่าความชื้นของดินได้ หลักการคือ การวัดค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรด 2 ข้าง ในกรณีที่อ่านค่าความต้านทานได้น้อยก็แปลว่ามีความชื้นในดินมาก หรือดินชุ่มชื้นไม่ต้องรดน้ำ จากนั้นค่าที่อ่านได้ก็จะเอาป้อนให้กับวงจรเปรียบเทียบแรงดัน IC LM393 (DUAL DIFFERENTIAL COMPARATORS) โดยตั้งค่าได้จาก Variable Resistor ซึ่งเป็นการปรับค่าแรงดันที่ใช้ในการเปรียบเทียบ การตรวจวัดสภาพแวดล้อมจะใช้ทรานสมิตเตอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิของ Primus รุ่น HM006 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความชื้นและอุณหภูมิในตัวเดียวกันเหมาะสำหรับติดตั้งบนผนังหรือเพดานภายในห้องเพื่อแปลงความชื้นสัมพัทธ์ 0-100% RH และอุณหภูมิ 0-100°C ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า DC 4-20 mA, 0-10 VDC อุปกรณ์ตรวจจับการไหลของน้ำหรือของเหลวในท่อส่งน้ำ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์จะใช้โฟลว์สวิตช์ หากท่อส่งน้ำไม่มีน้ำไหลผ่านสวิทช์จะปิดปั๊มน้ำหรือมอเตอร์จะหยุดการทำงาน

หากความชื้นในดินมีค่าต่ำกว่าระดับที่ตั้งไว้รีเลย์สวิตช์จะส่งค่าไปยัง PLC เพื่อสั่งการรดน้ำให้กับพืช ทรานสมิตเตอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิจะเป็นตัววัดและส่งค่าไปยัง PLC เพื่อนำไปแสดงสถานะอุณหภูมิ และความชื้นในบรรยากาศภายในบริเวณแปลงพืช ณ ขณะนั้น สวิตช์ตรวจสอบการไหลจะใช้ตรวจสอบสถานะของน้ำและส่งค่าไปยัง PLC ว่ามีน้ำไหลเข้าสู่ระบบหรือไม่ และโซลินอยด์วาล์วใช้ในการควบคุมการเปิด-ปิดน้ำให้กับพืช โดยวาล์วจะถูกสั่งการจาก PLC ส่วนการติดตามการทำงานของระบบจะแสดงข้อมูลต่าง ๆ ของระบบผ่านหน้าเว็บไซต์บนอุปกรณ์ smart device เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถรับทราบสถานการณ์ทำงาน สามารถสั่งการเปลี่ยนแปลงค่าในการควบคุมระบบ และติดตามภาพสถานการณ์ในบริเวณแปลงทดลอง ณ เวลาขณะนั้นได้

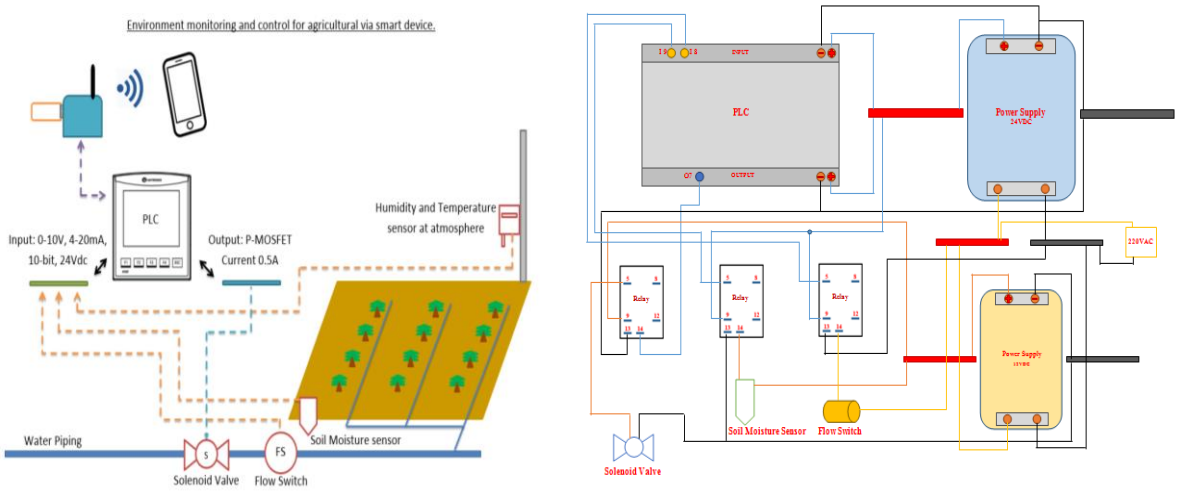


Figure 1 (A) Overall plant and system, (B) PLC connection with the trial.

ระบบ HMI (Human Machine Interface) และ PLC

การเชื่อมต่ออุปกรณ์การทดลองเข้ากับ PLC และสามาถติดต่อกับผู้ใช้งานได้ดังแสดงตามรูปที่ 1 PLC Unitronics ใช้โปรแกรม VisiLogic ในการเขียนโปรแกรมควบคุม รวมถึงการเขียน HMI และTouchscreen ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถดาว์นโหลดฟรีได้โดยตรงจากเว็บไซต์ Unitronic.com เมื่อดาว์นโหลดโปรแกรมแล้วจะเริ่มต้นด้วยการตั้งค่าฮาร์ดแวร์ (hardware) ที่เกี่ยวข้องกับ PLC เลือกรุ่นตาม PLC ที่เราเลือกใช้งานหากมีอุปกรณ์เสริมต้องตั้งค่าที่ส่วนนี้ด้วยในที่นี้เราจะเลือกรุ่น V350-35-T2 จากนั้นกำหนดดิจิตอลอินพุต (Digital input) และดิจิตอลเอาต์พุต (Digital output) ที่ต่อใช้งานกับ PLC สามารถเขียนแลดเดอร์ (ladder) ควบคุมการทำงานได้ที่ Tab Ladder หากต้องการเขียน HMI และเขียนให้แสดงหน้าจอสัมผัส (Touchscreen) ได้ที่ Tab HMI

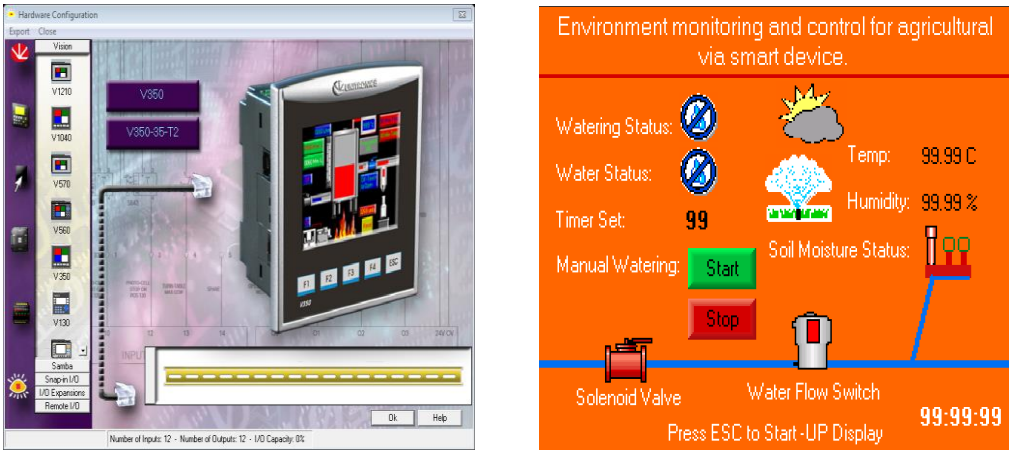


Figure 2 (A) Set up PLC (B) Main display on PLC.

Watering Status : แสดงผลว่า ณ ขณะนั้นระบบกำลังรดน้ำอยู่หรือไม่

Water Status : แสดงผลว่า ระบบสั่งรดน้ำแล้ว น้ำไหลเข้าสู่ระบบหรือไม่

Timer Set : ตั้งหน่วงเวลาการรดน้ำในแต่ละครั้ง ที่มีการส่งค่าจาก Soil Moisture Switch

Manual Watering : สั่งรดน้ำด้วยตนเอง

Temp : แสดงระดับอุณหภูมิ ณ บริเวณแปลงทดลอง

Humidity : แสดงระดับความชื้นบรรยากาศ ณ บริเวณแปลงทดลอง

Soil Moisture Status : แสดงผลว่า ระดับความชื้นในดินยังอยู่ในระดับที่ต้องการหรือไม่

Solenoid Valve : แสดงผลว่าวาล์วอยู่ในสถานะปิดหรือเปิด

Water Flow Switch : แสดงผลว่า ณ ขณะนั้น มีน้ำไหลในระบบหรือไม่

แปลงสาธิตการทดลอง

เตรียมแปลงทดลองจำนวน 2 แปลง ให้แปลงที่ 1 ใช้ PLC ควบคุมการให้น้ำกับพืชโดยเป็นแบบติดตามสถานะ และสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆแปลงเพาะปลูก ส่วนแปลงที่ 2 ใช้อุปกรณ์ตั้งเวลาในการควบคุมการให้น้ำแก่พืช โดยติดตั้งท่อให้น้ำพีอีพร้อมหัวจ่ายน้ำแบบฝอย องศาของการจ่ายน้ำคือ 180 องศา ระยะห่างของหัวจ่ายน้ำอยู่ที่ 30 เซนติเมตร ทั้ง 2 แปลง

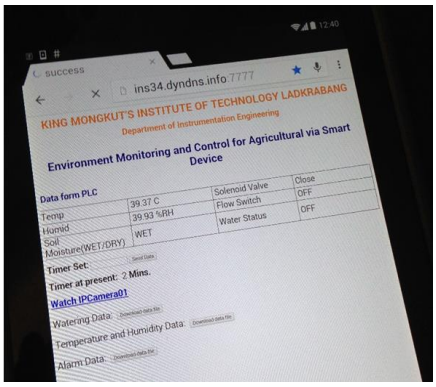
แปลงที่ 1 ใช้ PLC ควบคุมในการจ่ายน้ำโดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในดินเป็นตัวส่งสัญญาณไปยัง PLC เพื่อสั่งรดน้ำ ตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นในดินที่นำมาใช้นี้เป็นชนิดรีเลย์ซึ่งสามารถปรับตั้งค่าระดับความชื้นที่ต้องการให้สวิตซ์ของรีเลย์เปิดทำงานได้ การปรับตั้งค่าความชื้นที่ต้องการนี้ ได้ทำการสอบเทียบค่าความชื้นจากอุปกรณ์ตรวจวัดระดับความชื้นในดินอีกชนิดหนึ่งที่สามารถแสดงผลค่าระดับความชื้นได้ โดยจะตั้งความชื้นให้อยู่ในระดับไม่ต่ำกว่าระดับ 3 (หากต่ำกว่าระดับนี้ดินจะส่งผลให้พืชเกิดการเหี่ยวเฉา) และจะใช้โซลินอยด์วาล์วที่ถูกควบคุมโดย PLC ในการจ่ายน้ำ และมีการติดตั้งโฟลว์สวิตช์เพื่อตรวจวัดการไหลของน้ำ ส่วนแปลงที่ 2 ใช้อุปกรณ์ตั้งเวลาในการควบคุมการให้น้ำแก่พืชโดยตั้งรดน้ำเป็นช่วงเวลาระหว่าง 07:00-07:03 น.และ 18:00-18:03 น.และใช้โซลินอยด์วาล์วเป็นตัวเปิด ปิดน้ำที่ถูกควบคุมโดยอุปกรณ์ตั้งเวลา

ปลูกพืชลงในแปลงทดลองทั้ง 2 แปลง โดยเลือกพืชที่มีช่วงอายุการเจริญเติบโตประมาณ 45 วัน เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบการเจริญเติบโต พืชที่เลือกปลูกคือ ผักกาดขาวใหญ่ ผักกวางตุ้ง ผักคะน้า และผักบุ้งจีน

Before   After

Figure 3 Crops planting demonstration before and after planting

ในบริเวณแปลงจะทำการติดตั้ง IP Camera ไว้เพื่อติดตามสถานการณ์ และเฝ้าดูการเจริญเติบโตของพืชในบริเวณแปลงได้ผ่านหน้าเว็บไซต์บนอุปกรณ์ smart device

A 

 B

Figure 4 (A) Communication via webpage on smart device, (B) IP Camera to monitor the situation

ผลการทดลองและวิจารณ์

ระบบควบคุมและติดตามสภาพแวดล้อมเพื่อการเกษตรผ่าน ได้ทำการตรวจจับความชื้นของดิน และสภาพอากาศ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขบน PLC ทำให้ระบบจะทำการรดน้ำให้กับพืชเมื่อดินมีความชื้นน้อย หรือต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งจะมีการกำหนดค่าให้มีการรดน้ำที่ให้กับพืชอย่างเหมาะสม โดยสามารถป้อนเวลาในการรดน้ำตามที่ต้องการ หรือตั้งเวลาในการรดน้ำในแต่ละครั้งที่ระบบสั่งรดน้ำได้ โดยสั่งชุดควบคุมผ่านทางหน้าเว็บไซต์ หรือ Smart Device จากการทดลองพบว่าพืชที่อยู่ในแปลงที่ 1 ซึ่งได้ใช้ PLC ในการควบคุมการให้น้ำโดยผ่านการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆ แปลง มีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าพืชที่อยู่ในแปลงที่ 2 ที่ใช้อุปกรณ์ตั้งเวลาในการควบคุมการให้น้ำ หากเปรียบเทียบความเจริญเติบโตของพืชในแต่ละชนิดพบว่า ผักบุ้งเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีทั้งในแปลงที่ 1 และ 2 ส่วนผักกาดขาวใหญ่ และผักคะน้าเจริญเติบโตได้ดีในแปลงที่ 1 และผักกวางตุ้งเจริญเติบโตได้ไม่ดีทั้งในแปลงที่ 1 และ 2 โดยการวัดการเจริญเติบโตของพืชวัดได้จากขนาดของใบ โดยผักกาดขาวใหญ่ ผักกวางตุ้ง ผักคะน้า วัดความกว้างของใบ และผักบุ้งจีนวัดได้ความยาวของใบ จาก Figure 5 และ 6 จะเห็นว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปการเจริญเติบโตของพืชแปลงที่ 2 จะคงที่และตายในที่สุด ซึ่งพืชในแปลงที่ 1 นั้นอาจได้รับการควบคุมระดับความชื้นในดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชอยู่ตลอดเวลา แตกต่างจากพืชที่อยู่ในในแปลงที่ 2 ที่ใช้อุปกรณ์ตั้งเวลาในการควบคุมการให้น้ำ ซึ่งความชื้นในดินอาจอยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ความชื้นในดินของแปลงที่ 2 อาจอยู่ในระดับสูงจนเกินไป อีกทั้งหากเกิดฝนตกแปลงทดลองที่ 2 ก็จะยังคงรดน้ำอยู่ตามเวลาที่ได้ตั้งไว้ ส่งผลให้รากของพืชบางชนิดที่ไม่ชอบน้ำมาก เกิดการเน่า และตายได้ ส่วนในแปลงที่ 1 ที่ถูกควบคุมโดย PLC นั้น สามารถติดตามผลได้ผ่านทางหน้าเว็บไซต์บนอุปกรณ์ Smart Device และเฝ้าดูสถานการณ์รอบๆ แปลงทดลองได้ตลอดเวลาด้วยการดูผ่าน IP Camera ซึ่งสะดวกต่อการเฝ้าติดตามผลในระยะไกลโดยไม่จำเป็นต้องอยู่ในพื้นที่แปลงเพาะปลูก



Figure 5 The trial period of the crop for 20 days

(1) Plot 1: Using PLC control watering, (2) Plot 2 : Using Timer control watering



Figure 6 The trial period of the crop for 45 days

(1) Plot 1: Using PLC control watering, (2) Plot 2 : Using Timer control watering

ซึ่งจากการทดลองได้มีการคำนวนหาความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์คือ แปลงที่ 1 เป็นระบบที่ใช้ PLC และเซนเซอร์ในการควบคุมระบบ มีต้นทุนระบบคิดเป็นเงินประมาณ 30,000 บาท ปริมาณน้ำที่ใช้คิดเป็นเงินประมาณ 44 บาท ส่วนแปลงที่ 2 เป็นระบบที่ใช้อุปกรณ์ตั้งเวลาซึ่งระบบนี้จะเป็นตัวแทนระบบที่ใช้แรงงานคนในการรดน้ำมีต้นทุนระบบประมาณ 48,000 บาท ปริมาณน้ำที่ใช้คิดเป็นเงินประมาณ 200 บาท การคำนวนนี้จะคิดที่ระยะเวลาในการปลูกพืชคือ 40 วัน จำนวน 200 แปลง แบ่งเป็นแปลงที่ใช้ PLC 100 แปลง และแปลงที่ใช้แรงงานคน 100 แปลง ซึ่งค่าน้ำของทั้ง 2 แปลงคิดจากร้อยล่ะที่คำนวนจากความถี่ของการรดน้ำ จะเห็นได้ว่าต้นทุนระบบของแปลงที่ 1 น้อยกว่าแปลงที่ 2 เท่ากับ 18,156 บาท ซึ่งถ้าเทียบการปริมาณผลผลิตที่เท่ากันแล้วแปลงที่ 1 จะมีความคุ้มค่ามากกว่าแปลงที่ 2

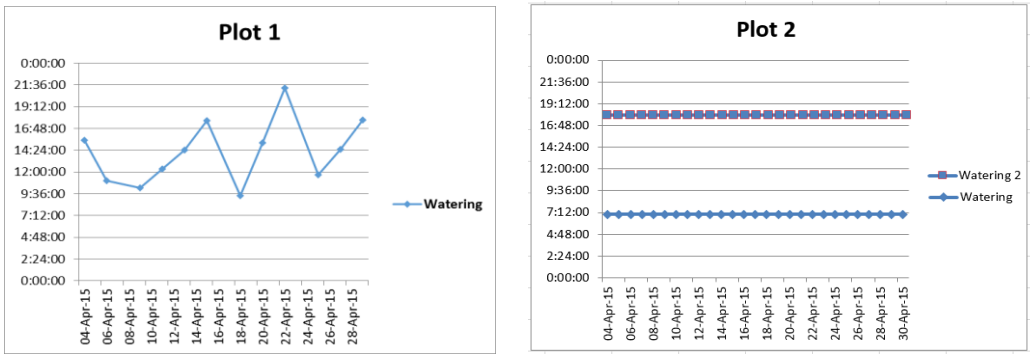


Figure 7 Show watering of Plot 1 and Plot 2

สรุป

งานวิจัยระบบควบคุมและติดตามสภาพแวดล้อมเพื่อการเกษตรผ่าน Smart Device จำลองการทำงานแปลงที่ 1 ด้วยการควบคุมการทำงานของ PLC โดยเขียนโปรแกรมควบคุมให้ระบบทำการรดน้ำแปลงเพาะปลูกแบบอัตโนมัติตามเงื่อนไข โดยมีการใช้ความสัมพันธ์ของความชื้นที่วัดได้มากำหนดการรดน้ำในแปลงเพาะปลูก และมีการตรวจจับความชื้นของดินเพื่อกำหนดเงื่อนไขบน PLC ซึ่งระบบจะทำการรดน้ำพืชเมื่อความชื้นในดินน้อยหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนดเอาไว้ ระบบสามารถตั้งค่าหน่วงเวลาที่ต้องการรดน้ำ ควบคุมระบบได้จากระยะไกล รวมถึงติดตามสภาพอากาศแวดล้อมบริเวณแปลงเพาะปลูก และสามารถเฝ้าดูสถานการณ์รอบบริเวณแปลงเพาะปลูกได้ตลอดเวลาด้วยการดูผ่าน IP Camera ผ่านทางหน้าเว็บไซต์บน Smart Device เปรียบเทียบกับแปลงที่ 2 คือการปลูกพืชโดยใช้ตัวตั้งเวลาในการควบคุมในการรดน้ำ โดยกำหนดให้รดน้ำเป็น 2 ช่วงเวลาต่อ 1 วัน ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบเหมือนเกษตรกรเข้าไปดูแลแปลงในทุกๆ วัน จากการทดลองพบว่าแปลงที่ 1 มีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าพืชที่อยู่ในแปลงที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติโดยมีการวัดค่าเพื่อนำไปวิเคราะห์ระบบ ทำให้ได้ผลผลิตออกมามีคุณภาพ และประหยัดทรัพยากรได้อีกด้วย จาก Figure 7 เห็นได้ชัดเจนเลยว่าแปลงที่ 1 ใช้น้ำในการรดน้ำให้กับแปลงเพาะปลูกน้อยกว่าแปลงที่ 2 ดูได้จากความถี่ของการรดน้ำที่แสดงในกราฟซึ่งจะเห็นได้ว่าประหยัดน้ำได้ถึงร้อยล่ะ 78 เมื่อเทียบจากการให้น้ำกับพืชของแปลงที่ 2 ดังนั้นหากเกษตรกรศึกษาความต้องการน้ำของพืชก็จะทำให้ใช้ทรัพยากรได้คุ้มค่า และประหยัดได้อีกด้วย ซึ่งจากงานวิจัยระบบที่ออกแบบเป็นระบบที่สามารถควบคุมได้จากระยะไกล เกษตรกรจึงไม่จำเป็นต้องเข้าไปในพื้นที่เพาะปลูก

นั่นหมายถึงทำให้ประหยัดแรงงานคน แต่ก็สามารถเพิ่มผลผลิตที่ดี มีคุณภาพได้อีกด้วย ทำให้เห็นว่าเราสามารถที่จัดการดูแลผลผลิตในการเพาะปลูกได้ พร้อมๆ กันในหลายๆ ที่ โดยที่เกษตรไม่ต้องเข้าไปพื้นที่เพาะปลูกก็สามารถทำให้ได้ผลผลิตตามที่ต้องการ และมีคุณภาพ

เอกสารอ้างอิง

จำเริญ ยืนยงสวัสดิ์. **น้ำและการให้น้ำ**. 2558. คณะทรัพยากรธรรมชาติมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ แหล่งที่มา: http://natres.psu.ac.th/Department/plantscience/510-111web/book/book%20content.htm/chapter09/agri_09.htm, 10 พฤศจิกายน 2558.

เกรียงกานต์ กาญจนะโภคิน. 2555. **ต่อไป ทุกอย่างจะเป็น Smart Device**. แหล่งที่มา: http://www.bangkokbiznews.com/blog/detail/468586, 10 พฤศจิกายน 2558.

ภาคภูมิ มโนยุทธ, มัลลิกา อุณหวิวรรธน์, วรรณรัช สันติอมรทัต. (2553). **ระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและการต่ออุปกรณ์เสริมเพื่อใช้ในสวนยางพารา**. งานประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2010. (1) : 1-6.

ระวิน สืบค้า. 2557. **การให้น้ำแบบหยดแก่ไม้ผลที่ปลูกเชิงแถบอนุรักษ์ในระบบเกษตรน้ำฝนบนที่ลาดชัน** วารสารนเรศวรพะเยา. (3) ธันวาคม 2557.

Beckwith, R.; Teibel, D.; Bowen, P. Report from the Field: **Results from an Agricultural Wireless Sensor Network**. In *Proceeding of 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, Tampa, FL, USA, 16–18 November 2004.

Yoo, S.; Kim, J.; Kim, T.; Ahn, S.; Sung, D. A2S: **Automated Agriculture System Based on WSN**. In *Proceedings of ISCE 2007. IEEE International Symposium on Consumer Electronics*, Irving, TX, USA, 20–23 June 2007.

A. Rosi, N. Bicocchi, G. Castelli, A. Corsini, M. Mamei, F. Zambonelli, M. Berti, P. Angove, B. O'Flynn, J. Hayes, D. Diamond, M. O'Grady, G.M.P. O'Hare, C.C. Vo, T. Torabi, W. Loke, and W. Seng, **"Environmental Monitoring and Task-Driven Computing"**, IEEE Pervasive Computing, vol. 9(4), pp. 48-50, 2010.

แนวทางการควบคุมปริมาณความสูญเสียของวัสดุในการก่อสร้างงานอาคารด้วยวิธีวิเคราะห์ผลงานที่ทำได้

Guidelines in Controlling Material Wastes in Building Construction by Earned Value Analysis method

วุฒิชัย ด่านกลาง[1*] และ เทอดธิดา ทิพย์รัตน์[1]

Wutthichai Danklang[1*] and Thoeditida Thipparat[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาโครงงานนี้ เป็นการพัฒนาแนวทางเพื่อช่วยการควบคุมการเกิดความสูญเสียของวัสดุจากการก่อสร้างงานอาคารของบริษัทรับเหมาขนาดกลาง ทำการศึกษาเกี่ยวกับการติดตามควบคุมความสูญเสียของวัสดุในโครงการ จากข้อมูลค่าใช้จ่ายด้านวัสดุในโครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยรวมสูง 8 ชั้น โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือการควบคุมต้นทุนด้านวัสดุด้วยวิธี Earned Value Analysis วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านวัสดุในรายการปริมาณวัสดุและค่าใช้จ่ายด้านวัสดุที่ที่เกิดขึ้น นำมาสร้างดัชนีชี้วัดสถานะความสูญเสียด้านวัสดุในโครงการ การวิจัยนี้รวบรวมข้อมูลด้านการวางแผนและควบคุมการใช้วัสดุจากฝ่ายก่อสร้าง ส่วนข้อมูลด้านการจัดซื้อวัสดุรวบรวมจากฝ่ายจัดซื้อ การเฝ้าติดตามผลการใช้และความสูญเสียของวัสดุ ช่วยให้ผู้รับเหมาหรือผู้จัดการโครงการใช้ตัดสินใจในการแก้ปัญหางานด้านวัสดุได้อย่างทันเหตุการณ์

ABSTRACT

This study aims to develop a guideline that helps control the construction material cost for a medium-sized contractor. The data was obtained from a construction project of a eight-storey residential building. The Earned Value Analysis is modified and applied as a technique for the material cost control to compare with the actual material cost against the cost in bill of quantity. The technique also determines material waste cost status using index calculation. Data associated with materials management including material planning and control process will be collected from a construction division. Data associated with procurement will be acquired from procurement division. This proposed method helps the contractors or project managers making corrective actions for material waste management efficiently.

Key Words: Material Wastes, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, behaviors on fresmen induction, undergraduate students

*Corresponding author; e-mail address: thiprat.t@gmail.com

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก กรุงเทพฯ 10400

[1]Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Bangkok, 10400

คำนำ

ความสูญเสียในงานก่อสร้างอาคารคือค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นแต่ไม่ได้เพิ่มมูลค่าของอาคารที่ก่อสร้าง ความสูญเสียของวัสดุมีผลกระทบต่อต้นทุนของโครงการเนื่องจากการลดปริมาณความสูญเสียของวัสดุในการก่อสร้างสามารถลดต้นทุนของวัสดุก่อสร้างและลดค่าใช้จ่ายในการจัดการในส่วนของการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นด้วย (นคร, 2545) ความสูญเสียแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ความสูญเสียที่ไม่สามารถลดได้ (Unavoidable waste) เนื่องจากลักษณะของงานที่จำเป็นต้องมีความสูญเสีย การลดความสูญเสียประเภทนี้ทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น หรือไม่คุ้มค่าในการลดความสูญเสีย และความสูญเสียที่สามารถลดได้ (Avoidable waste) เนื่องจากเป็นความสูญเสียที่เกิดจากการขาดการจัดการ และความสูญเสียนี้คุ้มค่าในการลงทุนป้องกันไม่ให้เกิดความสูญเสียขึ้น ผู้รับเหมาก่อสร้างแต่ละรายมีปริมาณสัดส่วนของความสูญเสียประเภทนี้แตกต่างกันตามระดับการจัดการในการก่อสร้าง และเทคโนโลยีในการก่อสร้าง Formoso และคณะ (1999) สาเหตุของความสูญเสียเกิดจากการขาดประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุ แรงงาน เครื่องมือ เครื่องจักร และเงินทุน มากกว่าปริมาณที่จำเป็นในการก่อสร้างอาคาร (Koskela, 1992) ของเสียสำคัญที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างมาจากความสูญเสียของวัสดุจากการทำงาน พบว่าผลกระทบจากปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างทำให้ลดปริมาณวัตถุดิบและพลังงาน และก่อให้เกิดการขนส่งที่เกินความจำเป็น (Wyatt, 1978)

แนวทางในการจัดการปัญหาความสูญเสียของวัสดุที่เสนอโดย United States Environmental Protection Agency หรือ USEPA (1988) แบ่งเป็น 4 ระดับ คือระดับที่ 1 Prevention ระดับที่ 2 Recycling ระดับที่ 3 Treatment และระดับที่ 4 Disposal และพบว่าจากแนวทางทั้ง 4 นั้นแนวทางที่ดีที่สุดคือการลด หรือป้องกันไม่ให้เกิดความสูญเสีย และเพราะการป้องกันการเกิดความสูญเสียได้แล้วก็จะส่งผลต่อระดับที่ 2, 3, และ 4 ให้มีปริมาณลดลงตามลำดับ

Earned Value Analysis ได้ถูกพัฒนาโดย Department of Defense ประเทศสหรัฐอเมริกาในช่วงทศวรรษ 1960 เพื่อควบคุมโครงการต่างๆ ของหน่วยงาน วิธีนี้เป็นวิธีการวัดผลดำเนินการของโครงการโดยการเปรียบเทียบผลงานจริงกับแผนงานที่วางไว้ในเชิงปริมาณตัวเลขจำนวนเงิน ผลการวิเคราะห์โครงการด้วย Earned Value Analysis ผู้จัดการโครงการสามารถติดตามควบคุมในระดับกิจกรรมและระดับโครงการให้ดำเนินการตามแผนงานที่กำหนด (Mueller, Frederick, 1986; Kharbanda et.al., 1987) ค่าหลักต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลงาน ได้แก่

1) ต้นทุนประมาณการของงานตามแผนเวลาที่ต้องการ(Budgeted Cost of Work Scheduled , BCWS)
2) ต้นทุนประมาณการของผลงานที่ดำเนินการ(Budgeted Cost of Work Performed , BCWP) หรือ Earned value (EV)
3) ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริงจากงานที่ดำเนินการแล้ว(Actual Cost of Work Performed , ACWP)

การวิเคราะห์ผลงานโดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่าหลักทั้ง 3 นี้มาสร้างดัชนีชี้วัดสถานะของงานได้ 3 ค่าคือ

1) ค่าดัชนีชี้วัดสถานะของระยะเวลาการทำงาน (Schedule Performance Index , SPI)

$$SPI = BCWP / BCWS \quad (1)$$

2) ค่าดัชนีชี้วัดสถานะของค่าใช้จ่ายของโครงการ (Cost Performance Index , CPI)

$$CPI = BCWP / ACWP \quad (2)$$

3) ค่าความแตกต่างในการควบคุมโครงการก่อสร้างมีการพิจารณาอยู่ 2 ค่า คือ

(1) ค่าความแตกต่างของแผนงาน (Schedule Variance, SV)

$$SV = BCWP - BCWS \quad (3)$$

ถ้า SV < 0 หมายถึงการดำเนินการกิจกรรมล่าช้ากว่ากำหนดเวลา

(2) ค่าความแตกต่างของต้นทุน (Cost Variance, CV)

$$CV = BCWP - ACWP \quad (4)$$

ถ้า CV< 0 หมายถึงต้นทุนที่เกิดขึ้นจริงในการทำกิจกรรมนั้นๆ สูงกว่างบประมาณที่ได้วางแผนไว้

การวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ทั้ง 4 ค่าข้างต้น (CV, SV, CPI และ SPI) ทำให้สรุปได้ว่า ถ้าค่าความสัมพันธ์ CV และ SV มีค่าเป็นลบ หรือถ้าค่าความสัมพันธ์ CPI และ SPI มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่ากิจกรรมที่เกี่ยวข้องหรืออาจรวมถึงโครงการที่เกี่ยวข้องทั้งโครงการกำลังมีปัญหาเนื่องจากผลการดำเนินงานจนกระทั่งถึงวันที่ทำการวัดเป็นไปในทิศทางที่ไม่ดี (Koh Wee Liang, 2003)

จากปัญหาความสูญเสียของวัสดุข้างต้น ทำให้เกิดปัญหาการบริหารต้นทุนค่าวัสดุของโครงการ เริ่มตั้งแต่ การประมาณการต้นทุนวัสดุ (Material cost estimating) การจัดทำงบประมาณต้นทุนวัสดุ (Material cost budgeting) และการควบคุมต้นทุนวัสดุ (Material cost control) การวางแผนด้านวัสดุก่อนเริ่มโครงการ ผู้บริหารจำเป็นต้องติดตามควบคุมการใช้วัสดุในระดับกิจกรรมและระดับโครงการ วิเคราะห์แนวโน้มความต้องการวัสดุ การประมาณการต้นทุนต้องถูกต้องเที่ยงตรงแม่นยำ งบประมาณที่ได้ตั้งไว้ก็เหมาะสมกับความเป็นจริง ในระหว่างดำเนินการโครงการต้องติดตามควบคุมค่าใช้จ่ายส่วนเกินที่เกิดจากการสูญเสียของวัสดุ การวิจัยนี้ใช้วิธี Earned Value Analysis วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านวัสดุในรายการปริมารวัสดุและค่าใช้จ่ายด้านวัสดุที่ที่เกิดขึ้น เพื่อเฝ้าติดตามผลการใช้และความสูญเสียของวัสดุ ช่วยให้ผู้รับเหมาหรือผู้จัดการโครงการใช้ตัดสินใจในการแก้ปัญหางานด้านวัสดุได้อย่างทันเหตุการณ์

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยนี้เก็บรวบรวมข้อมูล บัญชีรายการปริมาณวัสดุและอุปกรณ์ก่อสร้าง Bill of Quantity (BOQ) ค่าใช้จ่ายด้านวัสดุในโครงการก่อสร้างจริงที่กำลังดำเนินการอยู่ เป็นอาคารพักอาศัยรวมสูง 8 ชั้น (Figure 1) จากนั้นนำข้อมูลมาประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel



Figure 1 Residential building 8 floors: a case study project

การพัฒนาแนวทางการควบคุมปริมาณความสูญเสียของวัสดุในการก่อสร้างงานอาคารด้วยวิธี Earned Value Analysis มีขั้นตอนในการวิจัยทั้งหมด 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวม ศึกษา ค้นคว้า เอกสารและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนที่ 2 รวบรวมข้อมูลในบัญชีรายการปริมาณวัสดุและอุปกรณ์ก่อสร้าง Bill of Quantity (BOQ) ข้อมูลที่เกี่ยวของกับการสั่งซื้อ และข้อมูลการใช้วัสดุของแต่ละโครงการ

ขั้นตอนที่ 3 จัดทำแบบสอบถาม และเก็บข้อมูลจากบุคลากรในฝ่ายก่อสร้างและฝ่ายจัดซื้อ

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ดัชนีชี้วัดสถานะความสูญเสียด้านวัสดุในโครงการ

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์หาผลต่างวัสดุทางตรง ด้านราคา (Price Variance) โดยเปรียบเทียบระหว่างราคาใน BOQ กับราคาที่ระบุในใบสั่งซื้อ ใบส่งของและใบกำกับภาษี

ขั้นตอนที่ 6 วิเคราะห์หาผลต่างวัสดุทางตรง ด้านปริมาณ (Quantity Variance) โดยเปรียบเทียบระหว่างปริมาณวัสดุใน BOQ กับปริมาณวัสดุที่ใช้จริงในโครงการ

ขั้นตอนที่ 7 การสรุปผล และข้อเสนอแนะของงานวิจัย การวิเคราะห์ข้อมูล

การดำเนินงานศึกษาครั้งนี้ แบ่งการเก็บข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) รวบรวมจากกลุ่มตัวอย่างประเภทเอกสาร ของ โครงการกรณีศึกษา ซึ่งได้แก่
   (1.1) บัญชีรายการปริมาณวัสดุและอุปกรณ์ก่อสร้าง Bill of Quantity (BOQ) ซึ่งเป็นเอกสารแนบท้ายสัญญา
   (1.2) เอกสารใบสั่งวัสดุ บิลกำกับภาษีที่ซื้อวัสดุ ใบส่งสินค้า หรือ เอกสารอื่นๆ ที่มีราคาต่อหน่วยของวัสดุแต่ละชนิดระบุไว้ และใช้ในโครงการ จากการดำเนินงานก่อสร้างโครงการในช่วง.....
   (1.3) ใบสั่งของจากหน้างานและใบส่งของตั้งแต่เริ่มจนจบโครงการ
2) ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) รวบรวมจากกลุ่มตัวอย่างประเภทบุคคล โดยรวบรวมข้อมูลความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ จากแผนกที่เกี่ยวข้องในกระบวนการจัดการวัสดุ แล้วนำไปสรุปหาแนวทางแก้ไข แบ่งออกเป็น 2 ฝ่าย คือ ฝ่ายก่อสร้าง และฝ่ายจัดซื้อ ตัวแทนจากฝ่ายก่อสร้างประกอบด้วย ผู้ควบคุมงานและหัวหน้าภาคสนาม ส่วนตัวแทนจากฝ่ายจัดซื้อประกอบด้วย หัวหน้างานและเจ้าหน้าที่จัดซื้อ เจ้าหน้าที่วางแผนการซื้อและสโตร์

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแนวทางเพื่อช่วยการควบคุมการเกิดความสูญเสียของวัสดุจากการก่อสร้างงานอาคาร โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือการควบคุมต้นทุนด้านวัสดุด้วยวิธี Earned Value Analysis วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านวัสดุในรายการปริมารวัสดุและค่าใช้จ่ายด้านวัสดุที่ที่เกิดขึ้น นำมาสร้างดัชนีชี้วัดสถานะความสูญเสียด้านวัสดุในโครงการ

ค่าหลักต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสูญเสียด้านวัสดุในโครงการ ได้แก่

1) BCME : Budgeted cost for material estimated หมายถึง ค่าวัสดุคิดจากปริมาณวัสดุที่ถอดปริมาณจากแบบและปรากฏใน BOQ.กับราคาตามงบประมาณ ณ วันที่ประเมิน
2) BCMU : Budgeted cost for material used (Earned Value) หมายถึง ค่าวัสดุคิดจากปริมาณวัสดุที่ใช้จริงกับราคาตามงบประมาณ ณ วันที่ประเมิน หรือ Earned value (EV)

3) ACMU : Actual cost for material used หมายถึง จำนวนเงินรวมที่ใช้จ่ายไปจริงสำหรับค่าวัสดุที่ใช้จริง ณ วันที่ประเมิน

การวิเคราะห์ผลงานโดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่าหลักทั้ง 3 นี้มาสร้างดัชนีชี้วัดสถานะของงานได้ 3 ค่าคือ

1) ค่าดัชนีชี้วัดสถานะของวัสดุ (Material Performance Index , SPI)

$$MPI = BCMU/BCME \quad (4)$$

4) ค่าดัชนีชี้วัดสถานะของค่าใช้จ่ายด้านวัสดุของโครงการ (Cost Performance Index , CPI)

$$CPI = BCMU/ACMU \quad (5)$$

5) ค่าความแตกต่างในการควบคุมโครงการก่อสร้างมีการพิจารณาอยู่ 2 ค่า คือ

(1) ค่าความแตกต่างของวัสดุ (Material Variance, MV)

$$MV = BCMU-BCME \quad (6)$$

ถ้า MV > 0 หมายถึงการดำเนินการโครงการมีของเสียจากวัสดุมาก

(2) ค่าความแตกต่างของต้นทุน (Cost Variance, CV)

$$CV = BCMU – ACMU \quad (8)$$

ถ้า CV< 0 หมายถึงต้นทุนค่าวัสดุที่เกิดขึ้นจริงในการทำกิจกรรมนั้นๆ สูงกว่างบประมาณด้านวัสดุที่ได้วางแผนไว้

ตามหลักการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ทั้ง 4 ค่าข้างต้น (CV, MV, CPI และ MPI) นั้น พอจะสรุปได้ว่า ถ้าค่าความสัมพันธ์ CV มีค่าเป็นลบ ถ้า MV มีค่าเป็นบวก หรือถ้าค่าความสัมพันธ์ CPI มีค่าน้อยกว่า 1 เป็นการบ่งชี้ว่าราคาวัสดุต่อหน่อยที่ซื้อจริงสูงกว่าราคาที่ผู้ประเมินไว้ แต่ MPI มีค่ามากกว่า 1 เป็นเรื่องของการใช้ปริมาณหน่วยวัสดุเกินกว่าที่ประเมินไว้

ในการศึกษาได้ประเมินความสูญเสียของวัสดุในโครงการก่อสร้างจริงที่กำลังดำเนินการอยู่ เป็นอาคารพักอาศัยรวมสูง 8 ชั้น (Figure 1) จากนั้นนำข้อมูลมาประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel โดย Figure 2 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่รวบรวมได้และใส่ในโปรแกรม Microsoft Excel ที่พัฒนาขึ้น โดยแสดงในกิจกรรมงานฐานราก ชั้นใต้ดินของหมวดงานโครงสร้างชั้นใต้ดิน Figure 3 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยแสดงในกิจกรรมงานฐานราก ชั้นใต้ดิน ของหมวดงานโครงสร้างชั้นใต้ดิน

ลำดับ	รายการ	ปริมาณตาม BOQ		ปริมาณที่ทำจริง		ราคาMATERIAL ตาม BOQ		ราคาMATERIALที่สั่งซื้อจริง	
		Unit	Q'TY	Unit	Q'TY	UNIT RATE	TOTAL	UNIT RATE	TOTAL
	รวมงานดิน และงานกันซึมชั้นใต้ดิน								
1.2	งานฐานราก ชั้นใต้ดิน								
1.2.1	คอนกรีตโครงสร้าง 280 KSC. (CYLINDER) ผสมน้ำยากันซึม	ลบ.ม.	196.70	ลบ.ม.	210.00	1,890.00	371,763.00	1,890.00	396,900.00
1.2.2	ไม้แบบ	ตร.ม.	586.20	ตร.ม.	587.52	220.00	128,964.00	182.29	107,100.00
1.2.3	ตะปู	กก.	146.50	กก.	150.00	50.00	7,325.00	39.38	5,906.25
1.2.4	RB 6 มม. SR 24	กก.	48.90	กก.	59.00	21.25	1,039.13	23.87	1,408.33
1.2.5	RB 9 มม. SR 24	กก.	844.80	กก.	875.00	20.06	16,946.69	21.18	18,532.50
1.2.6	DB 12 มม. SD 40	กก.	1,039.80	กก.	1,049.00	19.94	20,733.61	20.85	21,871.65
1.2.7	DB 16 มม. SD 40	กก.	2,235.80	กก.	2,290.00	19.64	43,911.11	20.85	47,746.50
1.2.8	DB 20 มม. SD 40	กก.	10,247.70	กก.	10,250.00	19.64	201,264.83	19.64	201,310.00
1.2.9	DB 25 มม. SD 40	กก.	16,940.40	กก.	16,900.00	19.64	332,709.46	19.64	331,916.00
1.2.10	DB 28 มม. SD 40	กก.	-	กก.	-	-	-	-	-
1.2.11	DB 32 มม. SD 40	กก.	-	กก.	-	-	-	-	-
1.2.12	ลวดมัดเหล็ก	กก.	938.60	กก.	920.00	50.00	46,930.00	26.45	24,334.00
	งานอื่นๆ								

Figure 2 Data inputted on Microsoft Excel for Research by Earned Value Analysis.

ลำดับ	รายการ	BCME	BCMU	ACMU	MV	CV	MPI	CPI	หมายเหตุ
	รวมงานดิน และงานกันซึมชั้นใต้ดิน								
1.2	งานฐานราก ชั้นใต้ดิน								
1.2.1	คอนกรีตโครงสร้าง 280 KSC. (CYLINDER) ผสมน้ำยากันซึม	371,763.00	396,900.00	396,900.00	-	-	1.07	1.00	PC Rate
1.2.2	ไม้แบบ	128,964.00	129,254.40	107,100.00	22,154.40	22,154.40	1.00	1.21	
1.2.3	ตะปู	7,325.00	7,500.00	5,906.25	1,593.75	1,593.75	1.02	1.27	
1.2.4	RB 6 มม. SR 24	1,039.13	1,253.75	1,408.33	- 154.58	- 154.58	1.21	0.89	PC Rate
1.2.5	RB 9 มม. SR 24	16,946.69	17,552.50	18,532.50	- 980.00	- 980.00	1.04	0.95	PC Rate
1.2.6	DB 12 มม. SD 40	20,733.61	20,917.06	21,871.65	- 954.59	- 954.59	1.01	0.96	PC Rate
1.2.7	DB 16 มม. SD 40	43,911.11	44,975.60	47,746.50	- 2,770.90	- 2,770.90	1.02	0.94	PC Rate
1.2.8	DB 20 มม. SD 40	201,264.83	201,310.00	201,310.00	-	-	1.00	1.00	PC Rate
1.2.9	DB 25 มม. SD 40	332,709.46	331,916.00	331,916.00	-	-	1.00	1.00	PC Rate
1.2.10	DB 28 มม. SD 40	-	-	-	-	-			
1.2.11	DB 32 มม. SD 40	-	-	-	-	-			
1.2.12	ลวดผูกเหล็ก	46,930.00	46,000.00	24,334.00	21,666.00	21,666.00	0.98	1.89	
	งานอื่นๆ								

Figure 3 The Result of the Calculation By Earned Value Analysis (BCME, BCMU, ACMU, MV, CV, MPI and CPI)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลความสูญเสียของวัสดุที่ใช้ในกิจกรรมงานฐานราก ชั้นใต้ดินของหมวดงานโครงสร้างชั้นใต้ดิน พบว่า วัสดุส่วนใหญ่มีค่า MPI มากกว่า 1 แสดงว่าโครงการมีปัญหาในการจัดการวัสดุ หรือมีความสูญเสียของวัสดุ อย่างไรก็ตามการสูญเสียของวัสดุดังกล่าวยังไม่มีผลกระทบต่อต้นทุนของโครงการ เนื่องจากค่า CPI มีค่ามากกว่า 1 เช่นวัสดุประเภทคอนกรีตโครงสร้าง 280 KSC. (CYLINDER) ผสมน้ำยากันซึม ไม้แบบ ตะปู และลวดผูกเหล็ก ยกเว้นวัสดุประเภทเหล็กเส้น ที่มีปัญหาในการจัดการวัสดุและต้นทุนค่าวัสดุที่เกิดขึ้นจริงในการทำกิจกรรมนั้นๆ มากกว่างบประมาณด้านวัสดุที่ได้วางแผนไว้เนื่องจากค่า CPI มีค่าน้อยกว่า 1 Figure 4-6 แสดงตัวอย่างความสูญเสียของวัดสุที่เกิดขึ้นในกิจกรรมงานฐานราก ชั้นใต้ดินของหมวดงานโครงสร้างชั้นใต้ดิน



Figure 4 Concrete waste due to poured concrete wall problem



Figure 5 Formwork waste due to method statement problem



Figure 6 Dowel bar waste due to error from bar cutting list

จากการศึกษาปัญหาด้านการจัดการวัสดุ การวิเคราะห์สาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดซื้อ และด้านการวางแผน และควบคุมการใช้ ของโครงการกรณีศึกษา พบว่ามีปัจจัยที่ทำให้เกิดความสูญเสียของวัสดุ ในงานก่อสร้าง มีอยู่ 7 ปัจจัย มีดังนี้

1) ปริมาณวัสดุที่ส่งให้สำนักงานให้มีจำนวนผิดพลาด เนื่องจากการถอดปริมาณวัสดุตามแบบและรายละเอียดที่ใช้หน้างานไม่ละเอียด

2) งานทำให้ผิดมาตรฐานที่กำหนด ทำให้ต้องแก้ไขหรือทำงานใหม่ ส่งผลให้เกิดความสูญเสียของวัสดุขึ้น เนื่องจากช่างที่เป็นหัวหน้างานไม่มีทักษะและความรู้อย่างเพียงพอ

3) ความสูญเสียเนื่องจากการจัดเก็บวัสดุ เนื่องจากสถานที่จัดเก็บในหน่วยงานก่อสร้างภาคสนามมีเสี่ยงต่อความเสียหาย

4) การเร่งงานเนื่องจากช่วงเวลาในการดำเนินงานสั้นเกินไป และต้องใช้วัสดุที่มีความพิเศษกว่าปกติ ราคาสูงกว่าปกติ

5) ความไม่มีความรัดกุมในขั้นตอนการควบคุมการรับ การเบิก - จ่าย วัสดุ

6) ความไม่เข้มงวดในการควบคุมงานของหัวหน้างาน เช่น ไม่มีการตรวจแบบก่อนเทคอนกรีตคานคอนกรีตทำให้แบบแตกขณะเทคอนกรีต ต้องรื้อแบบแล้วประกอบเทคอนกรีตใหม่

7) การใช้เครื่องมือ เครื่องจักรที่ผิดประเภท เกิดจากความไม่พร้อมของหน่วยงาน หรือความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ของหัวหน้างานและคนงาน

สรุป

บทความนี้นำเสนอแนวทางเพื่อช่วยการควบคุมการเกิดความสูญเสียของวัสดุจากการก่อสร้างงานอาคารของบริษัทรับเหมาขนาดกลาง โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือการควบคุมต้นทุนด้านวัสดุด้วยวิธี Earned Value Analysis ในการติดตามควบคุมความสูญเสียของวัสดุในโครงการ โครงการกรณีศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยรวมสูง 8 ชั้น ข้อมูลที่รวบรวมจากโครงการประกอบด้วยค่าใช้จ่ายด้านวัสดุในรายการปริมารวัสดุและค่าใช้จ่ายด้านวัสดุที่ที่เกิดขึ้น ปริมาณวัสดุที่ถอดจากแบบก่อสร้างและปริมาณวัสดุที่ใช้จริง ผลการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดสถานะความสูญเสียด้านวัสดุในโครงการอันประกอบด้วย BCME, BCMU, ACMU, MV, CV, MPI, and

CPI พบว่าวัสดุส่วนใหญ่มีค่า MPI มากกว่า 1 แสดงว่าโครงการมีปัญหาในการจัดการวัสดุ หรือมีความสูญเสียของวัสดุ อย่างไรก็ตามการสูญเสียของวัสดุดังกล่าวอาจมีผลกระทบหรือไม่มีผลกระทบต่อต้นทุนของโครงการ ทั้งนี้ต้องพิจารณาร่วมกับค่า CPI สำหรับโครงการกรณีศึกษามีวัสดุหลายประเภทที่ความสูญเสียด้านวัสดุมีผลกระทบต่อต้นทุนในงานก่อสร้าง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เอ็น.ซี.เฮ้าส์ซิ่ง จำกัด (มหาชน) ,บริษัทสถาพรวัฒนา ค้าวัสดุ จำกัด ,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย และ ดร.เทอดธิดา ทิพย์รัตน์ ที่สนับสนุนข้อมูลในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

นคร กกแก้ว. (2545) **การศึกษาแนวทางในการลดปริมาณของเสียจากการก่อสร้างในประเทศไทย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

Formoso, C.T., Isatto, E.L., and Hirota, E.H. 1999. Method for Waste Control in the Building Industry." Proc. 7th Ann. **Conf. Intl. Group for Lean Constr., IGLC-7, in CA, United States**. 1999.

Koskela, L. 1992. Application of the New Production Philosophy to Construction." CIFE, Technical Report No. 72, Stanford, USA.

Wyatt, D.P. 1978. **Material Management**, Part I, The Chartered Institute of Building, Berkshire, England,1978.

United States Environmental Protection Agency.1988. **Waste Minimization Opportunity Assessment Manual**. Hazardous Waste Engineering Research Laboratory USEPA, Ohio, Cincinnati, United States of America.

Mueller, Frederick Wm. 1986. **Integrated Cost & Schedule Control for Construction Projects**. New York. Van Nostrand Reinhold Company.

Kharbanda, O.P., Stallworthy, E.A. & Williams L.F. 1987. **Project Cost Control in Action**. England. Gower Technical Press Ltd.

Koh Wee Liang. 2003. **Cost Control in Construction Project of The Site**. University of Technology Malysia.

การลดความกระด้างของน้ำบาดาล กรณีศึกษาน้ำบาดาลก่อนเข้าหอหล่อเย็นของอุตสาหกรรมพลาสติก

Hardness Reduction of Groundwater Case Study Groundwater Used in a Cooling Tower of Plastic Industry

สุพัตรา บุตรเสรีชัย[1*] ยุวรัตน์ เงินเย็น[2] กุญชร ผ่องแผ้ว[2] ภุชงค์ พุ่มทองดี[2] และกนกวรรณ กกรัมย์[2]

Supattra Budsaereechai[1*] Yuvarat Ngernyen[2] Kunchorn Pongpaew[2] Puchong Poomthongdee[2] and Kanokwan Kokram

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำบาดาลเพื่อลดความกระด้างของน้ำก่อนนำไปใช้ในหอหล่อเย็นในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก โดยใช้วิธีการบำบัด 3 วิธี ได้แก่ วิธีการตกตะกอน วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ เรซิน และวิธีออสโมซิสผันกลับ จากการทดลองโดยการเก็บน้ำตัวอย่างมาวัดค่าความกระด้างทั้งหมด พบว่าในช่วงเดือนสิงหาคม – กุมภาพันธ์ น้ำมีความกระด้างทั้งหมดอยู่ในช่วง 330 – 869 mg/L as $CaCO_3$ โดยภายหลังการบำบัดจากทั้ง 3 วิธี พบว่า วิธีบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ วิธีออสโมซิสผันกลับ แต่เมื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แล้ว วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินมีความคุ้มค่ามากกว่า

ABSTRACT

This research was to study groundwater treatment to reduce the hardness of the water before using in cooling tower of plastic industry. The treatment process included sedimentation, ion exchange and reverse osmosis methods. The experiments were investigated during August to February. It was found that the water sample had total hardness in the range 330 – 869 mg/L as $CaCO_3$. After treatment, reverse osmosis gave the highest efficiency. However, ion exchange was also a suitable method considering in term of economics.

Key Words: Hardness, Sedimentation, Ion exchange, Reverse osmosis

* Corresponding author; e-mail address: supattra.en.cpru@hotmail.com

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ อ.เมือง จ.ชัยภูมิ 36000

[1] Faculty of Engineering, Chaiyaphum Rajabhat University, Amphur Muang, Chaiyaphum 36000

[2]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

[2] Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Amphur Muang, Khon Kaen 40002

คำนำ

ในกระบวนการผลิตพลาสติกของโรงงานแห่งหนึ่งในจังหวัดขอนแก่น มีการใช้หอหล่อเย็น (cooling tower) โดยน้ำที่ใช้กับหอหล่อเย็นนั้นเป็นน้ำบาดาลที่ทางโรงงานสูบขึ้นมาใช้จากใต้ดินโดยไม่มีการบำบัด ซึ่งน้ำบาดาลนี้มีปริมาณความกระด้างประกอบอยู่ เมื่อนำน้ำกระด้างนี้มาใช้ในกระบวนการของหอหล่อเย็น ทำให้เกิดตะกรันที่เป็นฉนวนต่อการถ่ายเทความร้อน และทำให้ท่อน้ำ วาล์ว และข้อต่อต่าง ๆ เกิดการอุดตัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง สิ้นเปลืองพลังงาน และลดอายุการใช้งานของปั๊มน้ำ โดย Figure 1 แสดงตะกรันที่เกิดขึ้นในท่อน้ำของโรงงานพลาสติกแห่งนี้ ซึ่งมีความหนาของตะกรัน 1.65 เซนติเมตร หรือ 0.66 นิ้ว โดยทางโรงงานต้องเปลี่ยนระบบท่อน้ำใหม่ทุกปี ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และเสียเวลาในการเดินระบบท่อ ดังนั้น จึงต้องมีการบำบัดความกระด้างของน้ำก่อนการนำมาใช้ในกระบวนการของหอหล่อเย็น

ตะกรันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ตะกรันสนิม (pipe scale) ซึ่งเป็นตะกรันของโลหะออกไซด์ และตะกรันหินปูน (mineral scale) ซึ่งเป็นตะกรันที่ได้จากการตกผลึกของแร่ธาตุที่ละลายอยู่ในน้ำภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (มั่นสิน และ ไพพรรณ, 2540) โดยกระบวนการบำบัดน้ำประกอบด้วย กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี กระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางกายภาพ-เคมี (เกรียงศักดิ์, 2539) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดความกระด้างของน้ำบาลที่ใช้ในกระบวนการของห่อหล่อเย็นของโรงงานผลิตพลาสติกแห่งนี้ โดยได้เลือกวิธีบำบัด 3 วิธี ได้แก่ วิธีการตกตะกอน (sedimentation) ซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพ วิธีแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพ-เคมี และวิธีออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) ซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพ-เคมี เช่นกัน จากนั้น ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการบำบัดทั้ง 3 วิธี



Figure 1 Scale that occur in a pipe of a plastic manufacturing company in Khon Kaen province.

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์การทดลอง

ทำการออกแบบระบบบำบัดความกระด้างของน้ำบาดาล ทั้ง 3 วิธี ได้แก่ วิธีการตกตะกอน วิธีแลกเปลี่ยนไอออน และวิธีออสโมซิสผันกลับ ซึ่งมีรายละเอียดของการออกแบบในแต่ละวิธี ดังนี้

แบบจำลองการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอน ทำการออกแบบถังตกตะกอนจำนวน 3 ถัง ซึ่งมีขนาดของถังแต่ละถังคือ 30×30×30 เซนติเมตร (ปริมาตร 27,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยใช้พลาสติกอะคริลิค ความหนา

3 มิลลิเมตร โดยถังทั้ง 3 ถังจะทำงานเป็นระบบต่อเนื่อง เมื่อน้ำเต็มถังที่ 1 จะไหลสู่ถังที่ 2 และถังที่ 3 ตามลำดับ ดัง Figure 2 (a) ซึ่งก่อนทำบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอน ได้ทำการทดสอบ Jar Test ก่อน โดยการทดสอบ Jar Test คือ การทดสอบการสร้างตะกอน เป็นปฏิบัติการพื้นฐานทางด้านการบำบัดน้ำ เพื่อหาปริมาณและชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการสร้างตะกอนที่เหมาะสมกับลักษณะและสมบัติของน้ำที่ต้องการทดสอบ สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการสร้างตะกอน คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3.18\ H_2O$, Merck) หรือ สารส้ม โดยมีความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบ คือ 10 30 40 50 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะได้ว่าที่ความเข้มข้นมากกว่า 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า pH ของสารละลายจะต่ำกว่า 5 และที่ความเข้มข้น 40 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ผลการทดลองอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นในการทดลองจึงใช้สารส้มที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะที่ค่านี้จะทำให้ค่า pH ของน้ำอยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนดไว้ และไม่เป็นการสิ้นเปลืองสารส้ม

แบบจำลองการบำบัดด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน ประกอบด้วยถังกรองคาร์บอน และถังกรองเรซิน (แสดงดัง Figure 2 (b)) ซึ่งมีขนาดกว้าง 4 นิ้ว สูง 50 เซนติเมตร จำนวน 2 ท่อ ท่อแรกใช้สารกรองคือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) จำนวน 3 ลิตร และท่อที่ 2 ใช้สารกรองเรซิน จำนวน 3 ลิตร โดยเรซินที่ใช้เป็นชนิดแอนไอออน (anion) ของโซเดียมไอออน ซึ่งสามารถจับ OH^- และ Cl^- ไว้แลกกับประจุลบในน้ำ โดยแบบจำลองนี้มีความสามารถในการบำบัดน้ำ 150 ลิตรต่อชั่วโมง

แบบจำลองการบำบัดด้วยวิธีออสโมซิสผันกลับ ประกอบด้วยปั๊มน้ำแรงดันสูง (high pressure) เพื่อส่งผ่านไปยังไส้กรองใยสังเคราะห์ และผ่านเข้าเยื่อเมมเบรน โดยสามารถบำบัดน้ำได้ 7.8 ลิตรต่อชั่วโมง ดังแสดงใน Figure 2 (c)

วิธีการทดลองและการวิเคราะห์

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลของโรงงานตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ จากนั้นทำการบำบัดน้ำโดยใช้วิธีการบำบัดทั้ง 3 วิธี ได้แก่ วิธีการตกตะกอน วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซิน และวิธีออสโมซิสผันกลับ ซึ่งสำหรับการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอน และวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ทำการทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง ส่วนการบำบัดด้วยวิธีออสโมซิสผันกลับ ทำการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง

การวิเคราะห์น้ำก่อนและหลังการบำบัด ทำการวัดค่า pH และหาค่าความกระด้างทั้งหมด (total hardness) และค่าความกระด้างเนื่องจากแคลเซียม (calcium hardness) โดยใช้วิธี EDTA Titration Method ซึ่งใช้ Eriochrome Black T เป็น indicator และหาค่าความเป็นด่าง (alkalinity) โดยใช้วิธี Titration Method (กรรณิการ์, 2535)



(a) sedimentation (b) ion exchange (c) reverse osmosis

Figure 2 Model for treatment of hardness of groundwater.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์น้ำก่อนการบำบัด

ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลของโรงงานตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ ทั้งหมด 9 ครั้ง โดยผลการวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำบาดาลก่อนการบำบัด แสดงดัง Table 1 เมื่อ Total Hardness คือ ความกระด้างทั้งหมด ซึ่งเป็นความกระด้างอันเนื่องมาจากแคลเซียม (Calcium hardness) และแมกนีเซียม (Magnesium hardness) พบว่า ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน มีปริมาณน้ำฝนมาก ทำให้เกิดการชะล้าง ค่าความกระด้างทั้งหมดจึงมีค่าต่ำ โดยน้ำบาดาลของโรงงานมีค่าความกระด้างเนื่องมาจากแคลเซียมเฉลี่ย 374.18 mg/L as $CaCO_3$ ค่าความกระด้างเนื่องมาจากแมกนีเซียมเฉลี่ย 288.86 mg/L as $CaCO_3$ และมีค่าความกระด้างทั้งหมดเฉลี่ย 665.27 mg/L as $CaCO_3$ ซึ่งความกระด้างของน้ำนั้น แบ่งได้ ดังนี้ น้ำอ่อน มีความกระด้าง 0 – 75 mg/L as $CaCO_3$ น้ำค่อนข้างกระด้าง มีความกระด้าง 75 – 150 mg/L as $CaCO_3$ น้ำกระด้าง มีความกระด้าง 150 – 300 mg/L as $CaCO_3$ และน้ำกระด้างมาก มีความกระด้างมากกว่า 300 mg/L as $CaCO_3$ (**ธนศิต คล้ายศรี. 2537**)

(มั่นสิน และ **ไพพรรณ, 2540**) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของตะกรันและพลังงานที่ต้องการในท่อเพิ่มขึ้น ดังนี้

$$\text{พลังงานที่ต้องการเพิ่มขึ้น (\%)} = 880 \times \text{ความหนาของตะกรัน (นิ้ว)}$$

ซึ่งตะกรันที่เกิดขึ้นในท่อน้ำของโรงงานมีความหนา 0.66 นิ้ว จึงมีความต้องการพลังงานเพิ่มถึง 580.8% ซึ่งตะกรันที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากความกระด้างของน้ำ ดังนั้น การลดความกระด้างของน้ำ จะช่วยลดการใช้พลังงาน

สำหรับค่า pH ที่มาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนดอยู่ในช่วง 5.5 – 9 ซึ่งน้ำบาดาลก่อนการบำบัดมีค่า pH ตามมาตรฐานกำหนด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.8 ดังแสดงใน Table 2 และสำหรับค่าความเป็นด่างทั้งหมด (total alkalinity) หรือ ค่าความสามารถของน้ำที่ทำให้กรดเป็นกลาง ของน้ำบาดาลก่อนการบำบัด ได้ทำการทดสอบและแสดงใน Table 2 เช่นกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 203.63 mg/L as $CaCO_3$ ความเป็นด่างของน้ำส่วนใหญ่เกิดจาก คาร์บอเนตไอออน(CO_3^{-2}) ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โดยน้ำที่มีไอออนตัวใดตัวหนึ่งในไอออนทั้ง 3 ชนิดนี้ จะมีค่าความเป็นด่างเสมอ โดยความเป็นด่างของน้ำตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปของแคลเซียมและแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต ซึ่งอาจจะมีโซเดียมไบคาร์บอเนตรวมอยู่ด้วย

Table 1 The hardness of groundwater before treatment.

Sample number / month (begin of month)	Calcium hardness (mg/L as $CaCO_3$)	Magnesium hardness (mg/L as $CaCO_3$)	Total hardness (mg/L as $CaCO_3$)
No.1 in August	417.60 (93.48%)	29.10 (6.52%)	446.70
No.2 in September	360.96 (81.01%)	84.60 (18.99%)	445.56
No.3 in October	329.64 (99.65%)	1.16 (0.35%)	330.80
No.4 in November	547.20 (75.19%)	180.54 (24.81%)	727.74
No.5 in December	586.25 (77.24%)	172.70 (22.76%)	758.95
No.6 in January	256.00 (32.34%)	535.49 (67.66%)	791.49
No.7 in mid January	192.50 (25.13%)	573.50 (74.87%)	766.00
No.8 in February	391.60 (45.06%)	477.40 (54.94%)	869.00
No.9 in mid February	285.87 (34.39%)	545.28 (65.61%)	831.15
Average	374.18 (56.44%)	288.86 (43.56%)	665.27

3.2 ผลการบำบัดน้ำ

ทำการบำบัดน้ำด้วยแบบจำลองทั้ง 3 วิธี โดยเลือกบำบัดน้ำตัวอย่างครั้งที่ 6 เดือนมกราคม ถึง น้ำตัวอย่างครั้งที่ 9 เดือนกุมภาพันธ์ รวมทั้งหมด 4 ตัวอย่าง เนื่องจากมีค่าความกระด้างทั้งหมดสูงที่สุดจากจำนวนน้ำตัวอย่างทั้ง 9 ครั้ง โดยผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแบบจำลองทั้ง 3 วิธี ต่อน้ำบาดาล 1 ลิตร ได้ผลการทดลองดังแสดงใน Table 3 และ Table 4 พบว่า ความสามารถในการบำบัดความกระด้างทั้งหมด เรียงตามลำดับดังนี้

ออสโมซิสผันกลับ >> แลกเปลี่ยนไอออน > ตกตะกอน

โดยมีความสามารถในการบำบัดค่าความเป็นด่างทั้งหมด เรียงตามลำดับดังนี้

ออสโมซิสผันกลับ >> ตกตะกอน > แลกเปลี่ยนไอออน

Table 2 The pH and total alkalinity of groundwater before treatment.

Sample number / month (begin of month)	pH	Total alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)
No.1 in August	7.3	102.67
No.2 in September	7.3	125.40
No.3 in October	7.3	203.67
No.4 in November	7.7	266.67
No.5 in December	6.5	282.66
No.6 in January	6.3	270.00
No.7 in mid January	6.2	273.40
No.8 in February	6.2	118.20
No.9 in mid February	6.1	190.00
Average	6.8	203.63

Table 3 Total hardness after treatment by various model per 1 liter of groundwater.

Sample number / month (begin of month)	Amount of total hardness that can be treat per 1 liter of groundwater (mg/L as $CaCO_3$)		
	Sedimentation	Ion exchange	Reverse osmosis
No.6 in January	0.29	4.34	N/A
No.7 in mid January	1.88	4.49	N/A
No.8 in February	0.64	5.06	95.81
No.9 in mid February	1.67	4.51	88.07
Average	1.12	4.60	91.94

Table 4 Total alkalinity after treatment by various model per 1 liter of groundwater.

Sample number / month (begin of month)	Amount of total alkalinity that can be treat per 1 liter of groundwater (mg/L as $CaCO_3$)		
	Sedimentation	Ion exchange	Reverse osmosis
No.6 in January	1.88	0.02	N/A
No.7 in mid January	4.63	0.02	N/A
No.8 in February	2.04	0.01	20.87
No.9 in mid February	1.94	0.07	22.82
Average	2.62	0.03	21.84

3.3 การเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในปัจจุบันทางโรงงานได้ทำการปรับเปลี่ยนระบบท่อน้ำทุกปี โดยในการปรับเปลี่ยนระบบท่อจะใช้ระยะเวลาในการปรับเปลี่ยน 2 วัน ต่อครั้ง ซึ่งคิดเป็นค่าเสียโอกาสในการผลิต 8 ตันต่อวัน รวมเป็น 16 ตัน เมื่อมูลค่าของสินค้าคือ กิโลกรัมละ 60 บาท ดังนั้น จึงมีมูลค่ารวมทั้งหมด 960,000 บาท ซึ่งหลังจากการปรับเปลี่ยนระบบท่อต้องมีการเริ่มระบบการผลิตใหม่ทั้งหมด โดยใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งการใช้ไฟฟ้าของโรงงานเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10,000 บาทต่อเดือนต่อเครื่องจักรการผลิตหนึ่งเครื่อง ดังนั้น อัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ยในการเริ่มระบบใหม่คือ 13.87 บาทต่อเครื่องจักรการผลิตหนึ่งเครื่อง หรือประมาณ 14 บาท (คิด 1 เดือน มี 30 วัน และใน 1 วัน ทำงาน 24 ชั่วโมง) โดยมีของเสียจากการปรับระบบให้คงที่ คิดเป็นมูลค่า 900 บาทต่อเครื่องจักรการผลิตหนึ่งเครื่อง รวมเป็น 914 บาทต่อเครื่องจักรการผลิตหนึ่งเครื่อง ซึ่งทางโรงงานมีเครื่องจักรการผลิตทั้งหมด 12 เครื่อง ดังนั้น รวมเป็นเงินทั้งหมด 10,968 บาท และการเปลี่ยนระบบท่อ มีค่าใช้จ่าย 25,000 บาทต่อครั้ง ดังนั้น ในการปรับเปลี่ยนระบบท่อ 1 ครั้ง คิดเป็นค่าเสียโอกาสรวม 995,968 บาท

จากการออกแบบและสร้างแบบจำลองการบำบัดน้ำทั้ง 3 วิธี มีค่าใช้จ่ายสำหรับความต้องการบำบัดน้ำ 5,000 ลิตรต่อชั่วโมง (ความต้องการของโรงงาน) ดังนี้ การบำบัดด้วยวิธีตกตะกอน มีอัตราส่วนของแบบจำลองต่อความต้องการบำบัดน้ำของทางโรงงาน คือ 1:100 โดยแบบจำลองมีมูลค่า 1,500 บาท ดังนั้น วิธีบำบัดวิธีนี้จึงใช้งบประมาณของระบบอยู่ที่ 150,000 บาท สำหรับการบำบัดด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน มีอัตราส่วนของแบบจำลองต่อความต้องการบำบัดน้ำของทางโรงงาน คือ 3:100 โดยแบบจำลองมีมูลค่า 3,500 บาท จึงใช้งบประมาณของระบบ 120,000 บาท ส่วนการบำบัดด้วยวิธีออสโมซิสผันกลับ มีอัตราส่วนของแบบจำลองต่อความต้องการบำบัดน้ำของทางโรงงาน คือ 0.15:100 มีค่าใช้จ่ายสำหรับเยื่อเมมเบรนขนาด 50 GPD สำหรับแบบจำลอง ราคา 5,600 บาท แต่สำหรับความต้องการของโรงงาน ต้องใช้เยื่อเมมเบรนขนาด 1,000 GPD จึงต้องใช้งบประมาณอยู่ที่ 450,000 บาท ซึ่งเมื่อพิจารณาการบำบัดน้ำบาดาลด้วยแบบจำลองวิธีต่าง ๆ ทั้งประสิทธิภาพการบำบัดต่อน้ำบาดาล 1 ลิตร และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า ควรใช้การบำบัดน้ำบาดาลด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซิน เนื่องจากมีต้นทุนที่ถูกกว่า และง่ายต่อการบำรุงรักษา

สรุป

จากการวิเคราะห์น้ำบาดาลที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกของโรงงานแห่งหนึ่งในจังหวัดขอนแก่น พบว่า มีค่าความกระด้างสูง จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อทำการบำบัดความกระด้างของน้ำนี้ จำนวน 3 วิธี ได้แก่ วิธีการตกตะกอน วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซิน และวิธีออสโมซิสผันกลับ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความกระด้างของน้ำบาดาล 1 ลิตร โดยใช้แบบจำลองที่ได้ทำการสร้างขึ้น พบว่า การใช้แบบจำลองออสโมซิสผันกลับ สามารถบำบัดความกระด้างของน้ำได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ แบบจำลองแลกเปลี่ยนไอออน และแบบจำลองการตกตะกอน ตามลำดับ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ตามความต้องการบำบัดน้ำของบริษัท จำนวน 5,000 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่า วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซิน มีต้นทุนของระบบบำบัดต่ำที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์ฝึกงานเทคโนโลยีสะอาด เครือข่ายมหาวิทยาลัยขอนแก่น สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้ให้การ (.สวทช) สนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ บริษัท ขอนแก่นพลาสติกประชาสโมสร จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์น้ำและให้ความร่ ตัวอย่างวมมือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ .2539 .**การบำบัดน้ำเสีย**. มิตรนราการพิมพ์.นนทบุรี ,

กรรณิการ์ สิริสิงห์ .2535 .**เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์**. มหาวิทยาลัยมหิดลกรุงเทพฯ ,.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. 2540 .**การปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับระบบหม้อไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบประปา**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ธนศิต คล้ายศรี .2537 .**เครื่องทำความสะอาดจากน้ำบาดาล**. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ผลกระทบแรงดันและเวลาในการต่อชนต่อความแข็งแรงและการสูญเสียเนื้อวัสดุจากการเชื่อมแบบแรงเสียดทานเหล็ก S45C และ SS400

Effect of Pressing Force and Time on the Welding Strength and Material Loss of the Friction Welding between S45C and SS400 Steel

สายันต์ เอี่ยมพรธนิต[1] องค์การ บุนนาค[2] ณฤพล อังคสุวรรณ[2] และ ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ[1,2*]

Sayan Ienpornthanit[1], Ongkarn Bunnag[2], Naruepon Ungkasuwan[2] and Ratchatee Techapiesancharoenkij[1,2*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรในการต่อชนที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมแบบแรงเสียดทานของเหล็กกล้าเกรด S45C และ SS400 เพื่อให้ได้ความแข็งแรงแนวเชื่อมที่ดี กระบวนการเชื่อมแบบแรงเสียดทานมีตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ รอบการเสียดทาน แรงดันการเสียดทาน เวลาในการเสียดทาน แรงดันในการต่อชน และเวลาในการต่อชน ซึ่งตัวแปรดังกล่าวส่งผลสำคัญต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม และการสูญเสียเนื้อวัสดุจากการเชื่อม ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวแปร 2 ชนิด ได้แก่ แรงดันและเวลาในการต่อชน จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบแรงดึง ความแข็งบริเวณแนวเชื่อม บริเวณโครงสร้างกระทบด้วยความร้อน และตรวจสอบการฉีกขาด จากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยทางด้านแรงดันในการต่อชนมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงและการสูญเสียเนื้อ ในขณะที่เวลาในการต่อชนมีผลในช่วงก่อนที่ชิ้นงานจะเย็นตัวเท่านั้น จากผลการวิจัย ทำให้ได้ตัวแปรที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม ได้แก่ แรงต่อชน 35 ตัน และเวลาต่อชน 8 วินาที โดยชิ้นงานเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงและความเหนียว ดังสังเกตได้จากการฉีกขาดเสียหายแบบเหนียวในรูปร่าง Cup Cone

ABSTRACT

This study investigated the effect of friction-welding parameters on the welding strength and the material loss of the friction welding between S45C and SS400 steels. The process parameters studied in this report were pressing force and time during the bonding process. The welded samples were tested and characterized on their tensile strength, hardness along the welding zone, heat affected zone (HAZ) and fracture modes. The results showed that the pressing force significantly increased not only the bonding strength but also caused higher material loss. The pressing time only influenced the bonding during short period (< 6 seconds). Pressing time of longer than 6 sec slightly affected the bonding because the samples already cooled down. This study provided the optimal processing parameters as the pressing force of 35 ton and time of 8 seconds.

Key Words: friction welding, steel, tensile strength, hardness, fracture, automotive parts

* Corresponding author; e-mail address: fengrct@ku.ac.th

[1]สาขาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Master of Engineering in Industrial Production Technology, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

รถยนต์และรถบรรทุกเป็นสินค้าที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนจำนวนมาก ซึ่งจะเกิดการสึกหรอหรือเสื่อมสภาพตามระยะการใช้งานหรือเมื่อเกิดอุบัติเหตุ ดังนั้น ชิ้นส่วนอะไหล่ทดแทนจึงมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ การพัฒนาคุณภาพการผลิตและผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตอะไหล่ทดแทนในประเทศ ให้ได้มาตรฐานเทียบเท่ากับอะไหล่ที่ผลิตจาก OEM โดยควบคุมต้นทุนการผลิต เพื่อเป็นตัวเลือกให้กับผู้บริโภค มีส่วนสำคัญต่อการเพิ่มขีดศักยภาพการแข่งขันของผู้ประกอบการในประเทศ

หนึ่งในชิ้นส่วนอะไหล่ทดแทนที่สำคัญได้แก่ คันส่งกลาง โดยคันส่งกลางมีลักษณะเป็นเพลายาว ทำให้ขึ้นรูปทั้งชิ้นได้ลำบาก กระบวนการเชื่อมโลหะ จึงมีบทบาทสำคัญในการขึ้นรูปชิ้นส่วนคันส่งกลาง โดยหนึ่งในกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน (Friction Welding) ซึ่ง ช่วยให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและใช้เวลาในการผลิตน้อยกว่าวิธีอื่น เหมาะกับการเชื่อมชิ้นงานรูปร่างทรงกระบอก และเหมาะสำหรับการเชื่อมชิ้นงานที่เป็นวัสดุคนละประเภทกันได้ โดยสำหรับคันส่งกลางในรถยนต์หลายยี่ห้อ นิยมใช้เหล็กกล้าสองเกรด ได้แก่ SS400 และ S45C มาเชื่อมต่อกัน

การเชื่อมแบบแรงเสียดทาน เป็นการเชื่อมซึ่งความร้อนสำหรับการเชื่อม เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเสียดสีไปเป็นพลังงานความร้อนที่ผิวของโลหะชิ้นงาน การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นตรงหน้าผิวสัมผัสของชิ้นงานสองชิ้นที่เกิดการเสียดสีกัน ชิ้นงานด้านหนึ่งจะถูกยึดอยู่กับที่ ส่วนอีกชิ้นจะเป็นชิ้นที่หมุน และมีแรงดันค่อยเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานสองชิ้นเกิดการสัมผัสและเสียดสีกันจนเกิดความร้อนที่สูงพอให้เนื้อวัสดุสองชิ้นสามารถสร้างพันธะเชื่อมติดได้ จึงหยุดหมุนและเพิ่มแรงดันเพื่อดันให้ชิ้นงานเกิดการสร้างพันธะเชื่อมติดกันภายในระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นแรงดันจะลดลงสิ้นสุดกระบวนการเชื่อม ซึ่งในช่วงแรกที่ชิ้นงานหมุนอยู่ จะเรียกว่าช่วงเสียดทาน ในขณะที่ช่วงสองที่ชิ้นงานหยุดหมุนแต่ยังมีแรงดันให้เกิดการเชื่อม จะเรียกว่าช่วงต่อชน (องค์การ และ ณฤพล 2558) ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานจะเกิดที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานอย่างรวดเร็ว ทำให้ชิ้นงานทั้งสองเกิดอุณหภูมิสูงในบริเวณรอยเชื่อม แต่ความร้อนจะไม่แพร่ลึกเข้าไปในเนื้อวัสดุเนื่องจากอุณหภูมิยังต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุทั้งสองชิ้น โดยการเชื่อมต่อนี้จะเกิดจากอิทธิพลของความดันที่มีขอบเขตอุณหภูมิในช่วง Plastic Temperature Range (Shiva Shankar, et al 2013).

องค์การ และณฤพล (2558) ศึกษาผลกระทบของแรงดันและความเร็วรอบในช่วงเสียดทานของการเชื่อมแบบเสียดทานของเหล็กกล้า SS400 และ S45C ที่มีผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม พบว่าตัวแปรที่เหมาะสม ได้การ รอบในการเสียดทาน 1200 รอบต่อนาที แรงดันและเวลาในการเสียดทานที่ 10 ตัน และ 6 วินาที ตามลำดับ โดยพบว่า ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อม มีความแข็งแรงที่สูงกว่าหรือใกล้เคียงกับชิ้นงาน SS400 (เนื่องจาก SS400 มีความแข็งแรงต่ำกว่า S45C) และการฉีกขาดจากแรงดึง จะเกิดในบริเวณเนื้อของ SS400 ที่อยู่นอกเหนือบริเวณผลกระทบร้อนจากการเชื่อม (Heat Affected Zone) โดยลักษณะความเสียหายเป็นแบบเหนียว Cup Cone ซึ่งเป็นรูปแบบความเสียหายมาตรฐานของเหล็ก SS400 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีความเหนียว จึงแสดงให้ได้เห็นว่าชิ้นงาน SS400 และ S45C ที่ผ่านการเชื่อมแบบเสียดทานยังสามารถคงความเหนียวของ SS400 สำหรับการสูญเสียเนื้อวัสดุเฉลี่ยอยู่ที่ 5.4 มิลลิเมตร ซึ่งตัวแปรในช่วงต่อชน คงที่ที่แรงดันต่อชน 35 ตันและเวลาต่อชน 8 วินาที โดยในรายงานดังกล่าว ไม่ได้ศึกษาหาปัจจัยช่วงต่อชนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดการสูญเสียเนื้อวัสดุและความแข็งแรงที่ดีขึ้น

จากผลการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่าน งานวิจัยนี้จึงต้องการปรับปรุงความแข็งแรงของแนวเชื่อมแบบแรงเสียดทานของเหล็กกล้า SS400 และ S45C โดยทดลองหาความสัมพันธ์ของตัวแปร เวลาในการต่อชน และแรงดันในการต่อชน หลังจากที่หยุดการเสียดทาน เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรดังกล่าวต่อความแข็งแรงในการเชื่อมต่อ โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม ปริมาณการสูญเสียเนื้อ รวมไปถึงวิเคราะห์ความเสียหายและรอยแตกจากแรงทางกล เพื่อที่จะสามารถให้ได้กระบวนการผลิตที่ช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนในการผลิต

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมชิ้นงาน

เตรียมชิ้นงานเพลาวัสดุ SS400 และชิ้นงานหัวคันส่งวัสดุ S45C จากการทุบขึ้นรูป (Forging) และเตรียมผิวชิ้นงานบริเวณที่จะเชื่อมให้เรียบ ด้วยการกลึงปาดผิวหน้าออก ทำการวัดความยาวของชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม โดยในการเชื่อมแบบเสียดทาน จะใช้ Jig ที่ทำขึ้นมาเฉพาะ เพื่อจับยึดชิ้นงานหัวคันส่งวัสดุ S45C (ดังแสดงใน Figure 1(A)) โดยระหว่างการเชื่อมแบบเสียดทาน ชิ้นงานเพลา SS400 จะเป็นตัวที่หมุน ต่อจากนั้น นำชิ้นงานทั้งสองชิ้นมาเชื่อมแบบเสียดทาน โดยให้ตัวแปรช่วงเสียดทานคงที่สอดคล้องกับรายงานโดย องค์การ และณฤพล (2558) ที่ รอบการเสียดทาน 1200 รอบต่อนาที แรงดันการเสียดทาน 10 ตัน และเวลาในการเสียดทาน 6 วินาที และปรับตัวแปรในช่วงการต่อชน ได้แก่ แรงดันต่อชน (15, 20, 25, 30, 35 ตัน) และ เวลาต่อชน (4, 6, 8 วินาที)

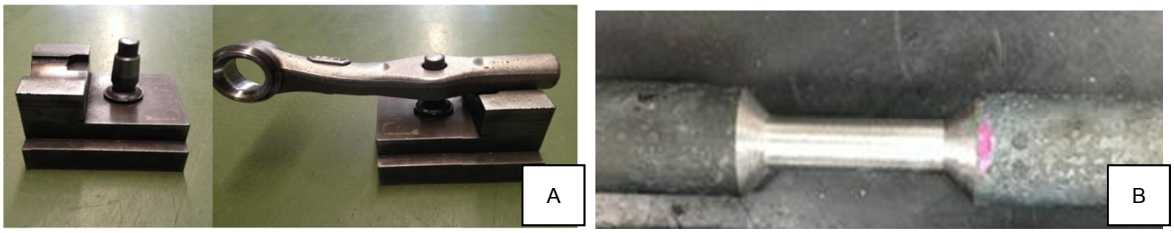


Figure 1 (A) A Jig for holding S45C Tie Rod during the friction-welding process; (B) Welded sample was machined into a standard dog-bone shape for a subsequent tensile test.

เมื่อทำการเชื่อมเสร็จ ปล่อยชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ และวัดขนาดชิ้นงานที่สั้นลงหลังการเชื่อม แล้วจึงนำชิ้นงานมากลึงให้ได้รูปร่างตามมาตรฐานสำหรับทดสอบแรงดึง (มานพ 2554; ศุภชัย 2546) โดยมีช่วงทดสอบแรงดึงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางผิวหน้าตัด 12.5 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Figure 1(B) แล้วจึงนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึง โดยมีการทดสอบวัดค่าแรงดึงของเหล็ก S45C และ SS400 ที่ไม่ผ่านการเชื่อมด้วย เพื่อใช้ประกอบการเปรียบเทียบ จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาทำการขัดผิวและกัดผิว เพื่อตรวจสอบ Heat Affected Zone ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และทดสอบวัดความแข็งที่บริเวณแนวเชื่อมและบริเวณผลกระทบร้อนจากการเชื่อม ด้วยเครื่อง Microvicker hardness test เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ ความแตกต่างของโครงสร้างที่มีผลต่อความแข็งแรงของการเชื่อม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบแรงดึง

ค่าต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile force) ของเหล็ก S45C และ SS400 ที่ไม่ผ่านการเชื่อม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9103 และ 7648 Kgf ตามลำดับ และค่าแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยของการเชื่อมแบบเสียดทานภายใต้ตัวแปรต่างๆที่ศึกษาในงานนี้แสดงสรุปใน Table 1 พบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันต่อชนสูงขึ้น ชิ้นงานทดสอบมีแนวโน้มแสดงความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกค่าเวลาต่อชน โดยพบว่าเมื่อใช้แรงดันต่อชนที่ 35 ตันและเวลา 8 วินาที จะทำให้ชิ้นงานเชื่อมมีความแข็งแรงสูงที่สุด และมีค่าสูงกว่าค่าแรงดึงสูงสุดของเพลาตัน SS400 และเมื่อเปรียบเทียบการเพิ่มเวลาในกาต่อชน พบว่าการเพิ่มเวลามีส่วนในการเพิ่มความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานเชื่อม แต่การเพิ่มเวลาไม่ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ต่อการเพิ่มความแข็งแรงอย่างชัดเจน โดยในบางค่าของแรงดันต่อชน เช่น 15 และ 30 ตัน พบว่าการเพิ่มเวลากลับส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดันของชิ้นงานเชื่อมมีค่าลดลง

Table 1 Tensile force of the welded samples under different pressing force and time (Unit: Kgf)

	Pressing Time		
Pressing Force (T)	4 Sec	6 Sec	8 Sec
15	5365	5900	5814
20	5469	5892	6266
25	6149	6763	7076
30	6350	7053	6645
35	7042	7185	8035

Table 2 Average length loss of the friction-welded sample, as compared to the initial length of the pre-weld samples, for varying pressing force and time during welding (Unit: mm)

	Pressing time		
Pressing force (T)	4 Sec	6 Sec	8 Sec
15	3.00	3.50	3.80
20	3.00	3.80	4.00
25	3.43	4.00	4.00
30	3.80	4.33	4.60
35	4.07	5.27	5.33

ผลการสูญเสียเนื้อโลหะจากการเชื่อม

ค่าเฉลี่ยการสูญเสียเนื้อโลหะ โดยการวัดค่าความยาวที่สั้นลง สำหรับเงื่อนไขการเชื่อมต่าง แสดงสรุปใน Table 2 จากผลการทดลอง เห็นได้ว่า การเพิ่มเวลาต่อชนจาก 4 เป็น 6 วินาที จะทำให้เกิดการเพิ่มการสูญเสีย

เนื้อวัสดุในอัตราส่วนที่สูง ในขณะที่การเพิ่มเวลาต่อชนจาก 6 เป็น 8 วินาที จะมีการเพิ่มอัตราการสูญเสียเนื้อที่ต่ำหรือไม่มีการสูญเสียเนื้อเพิ่มขึ้นเลย ซึ่งสาเหตุหลักน่าจะมาจากการเย็นตัวของชิ้นงานในช่วงเวลาตั้งแต่ 6 วินาทีเป็นต้นไป ส่งผลให้แม้จะเพิ่มเวลาต่อชนขึ้น ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อการเสียเนื้อของโลหะอีกต่อไป

การวิเคราะห์รอยแตกและการเสียหายจากการทดสอบแรงดึง

จากการวิเคราะห์รอยแตกฉีกขาดของชิ้นงานเชื่อม สามารถแบ่งรูปแบบการฉีกขาดออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ (1) ฉีกขาดแบบเปราะ มีพันธะการเชื่อมต่อไม่ครบทั้งผิวสัมผัส (Figure 2(A)) (2) ฉีกขาดแบบเปราะ มีพันธะการเชื่อมครับทั้งผิวสัมผัส (Figure 2(B)) และ (3) ฉีกขาดแบบเหนียวแบบ Cup Cone (Figure 2(C))



Figure 2 Three representative tensile-fracture modes that were observed from the samples after tensile tests. The observed fracture modes include (A) Brittle fracture mode with incomplete bonding, (B) Brittle fracture mode with complete bonding, and (C) Ductile Cup-Cone fracture mode with complete bonding.

สำหรับการฉีกขาดแบบที่ (1) แสดงใน Figure 2(A) การฉีกขาดจะขาดบริเวณเนื้อ S45C ใกล้บริเวณแนวเชื่อม และพบว่าพันธะเชื่อมติดกันบริเวณกึ่งกลางเท่านั้น ส่งผลให้ความแข็งแรงการเชื่อมต่ำ จะพบในกรณีของแรงและเวลาต่อชนที่ 15 ตัน 4 วินาที ซึ่งมีค่าต้านทานแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยที่ 5344 Kgf ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด ดังนั้นแรงต่อชน 15 ตัน เป็นเวลา 4 วินาที จึงไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดพันธะสมบูรณ์ได้

สำหรับการฉีกขาดแบบที่ (2) แสดงใน Figure 2(B) พบว่ามีพันธะเชื่อมติดตลอดผิว แต่การฉีกขาดเป็นแบบเปราะ ผิวแตกหักมีลักษณะเรียบ การฉีกขาดเสียหายจะกินเนื้อเข้าไปในบริเวณฝั่ง S45C ใกล้บริเวณ Heat Affected Zone ของแนวเชื่อม ลักษณะการเสียหายแบบนี้พบในชิ้นงานที่แรงและเวลาต่อชน ดังนี้ 15 ตัน 6, 8 วินาที, 20 – 25 ตัน ทุกช่วงเวลาการต่อชน, และ 30 ตัน ที่ 4 วินาที

สำหรับการฉีกขาดประเภท (3) ดังแสดงใน Figure 2(C) เป็นการฉีกขาดแบบเหนียว ทรง Cup Cone โดยการฉีกขาดเกิดในบริเวณเนื้อ SS400 ที่ห่างจากบริเวณ Heat Affected Zone ของแนวเชื่อม เป็นลักษณะความเสียหายที่ต้องการ เพราะแสดงถึงความแข็งแรงและความเหนียว โดยจะพบการฉีกขาดประเภทที่ (3) ในชิ้นงานที่ผ่านแรงและเวลาต่อชน ที่ 30 ตัน 6, 8 วินาที และ 35 ตันทุกช่วงเวลาต่อชน

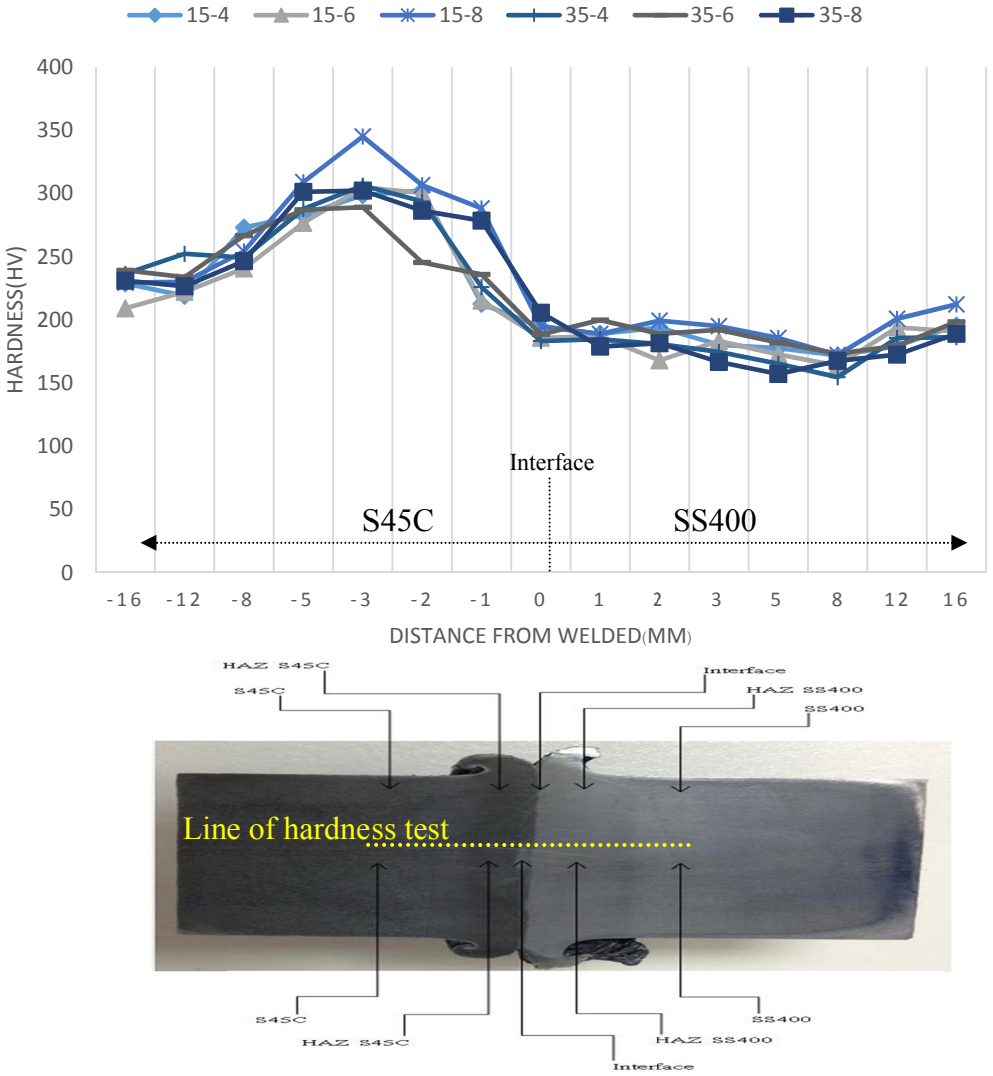


Figure 3 The top graphs show the results of hardness test (HV) plotted as a function of distance from the welded interface (mm) for selected welded samples: 15-4, 15-6, 15-8, 35-4, 35-6, 35-8 (i.e. 15-4 = Pressing force and time of 15 ton and 4 seconds, respectively). The bottom figure showed the cross-sectional picture of the welded sample that was prepared for the hardness measurement. Flash could be observed along the side of the sample close to welding interface.

ผลการวิเคราะห์ความแข็ง

ผลการวัดความแข็ง ด้วย Microvicker บริเวณใกล้รอยเชื่อมและ Heat Affected Zone (HAZ) แสดงใน Figure 3 จากผลความแข็ง พบว่าในบริเวณแนวเชื่อมเข้ามาในเนื้อด้าน SS400 ค่าความแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าความร้อนจากการการเชื่อมแบบเสียดทาน ไม่ได้ส่งผลกระทบกับเฟสโครงสร้างในบริเวณ SS400 ในทางตรงกันข้าม บริเวณแนวเชื่อมเข้ามาในเนื้อด้าน S45C พบว่าค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นในบริเวณ HAZ อย่างเห็นได้ชัด โดยค่าความแข็งสูงสุดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 300 – 350 HV ในขณะที่ค่าความแข็งของเนื้อพื้น S45C อยู่ในช่วง 220 – 230 HV ซึ่งจาก Hardness profile ใน Figure 3 สามารถประมาณระยะความกว้างของ HAZ ในด้าน S45C ที่ประมาณ 5 มิลลิเมตร โดยลักษณะความแข็งที่สูงขึ้นใน HAZ ด้าน S45C ทำให้หากมีการแตกหักด้าน S45C (ฉีกขาดประเภท (1) และ (2)) จะพบการฉีกขาดแบบเปราะ

ผลการวิเคราะห์ความกว้างของ Heat Affected Zone (HAZ)

เนื่องจากผลกระทบร้อนในการเชื่อมแบบเสียดทานครั้งนี้ ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงวัสดุด้าน SS400 ดังนั้นการวัดค่าความกว้างของ HAZ จึงวัดด้าน S45C เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการเชื่อมกับ HAZ width โดยการวัดความกว้าง HAZ ใช้ภาพถ่ายจุลภาคและโปรแกรม Optika Vision ในการวัด ดังแสดงตัวอย่างใน Figure 4. โดยผลการวัด HAZ width ในบริเวณ S45C ของทุกชิ้นงาน ได้สรุปใน Table 3

จากผลการค่าความกว้าง HAZ พบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันต่อชนสูงขึ้น ความกว้าง HAZ จะแคบลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มแรงดัน ชิ้นงานในบริเวณ HAZ ถูกอัดจนเนื้อชิ้นงานเคลื่อนที่ออกเป็นครีบ (Flash) ทางด้านขอบ (ดังรูปด้านล่างของ Figure 3) ในส่วนผลกระทบของเวลาในการต่อชน พบว่าที่เวลา 4 วินาทีจะมีความกว้างของ HAZ มากที่สุด ในขณะที่เวลา 6 และ 8 วินาที จะมีความกว้าง HAZ ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากชิ้นงานได้เย็นตัวแล้วที่เวลาเกิน 6 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับผลของเวลาต่อชนที่มีต่อการสูญเสียเนื้อชิ้นงานในข้างต้น

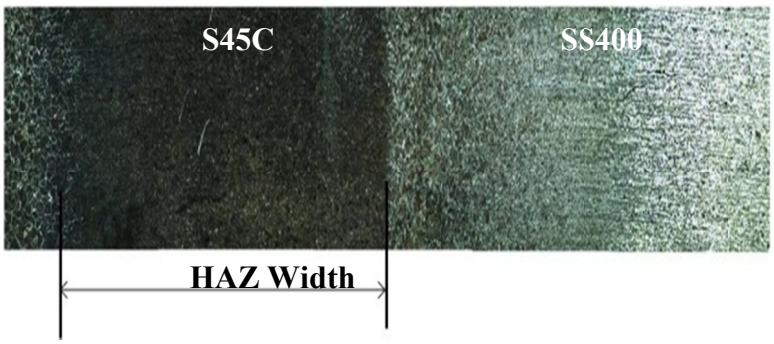


Figure 4 Representative cross-sectional microstructure of the HAZ of the welded sample for measuring the HAZ width in S450C

Table 3 The width of HAZ in S45C side for the welded samples under varying pressing force and time (Unit: mm)

Pressing force (T)	Pressing time		
	4 sec	6 sec	8 sec
15	5.84	5.62	5.61
25	4.70	4.33	4.29
35	4.49	4.28	4.23

สรุป

จากการศึกษาปรับค่าตัวแปรแรงดันต่อชนและเวลาต่อชน เพื่อดูผลกระทบต่อความแข็งแรงการเชื่อมและการสูญเสียเนื้อ พบว่า แรงดันในการต่อชนที่สูงขึ้นจะทำให้สูญเสียเนื้อวัสดุมากขึ้น แต่ก็ช่วยส่งผลให้ความแข็งแรงของพันธะเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน หากแรงดันต่อชนน้อยเกินไปจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมที่ไม่สมบูรณ์ตลอดผิวสัมผัส สำหรับปัจจัยเวลาต่อชน พบว่ามีผลกระทบต่อความแข็งแรงของการเชื่อมเพียงเล็กน้อย และสำหรับการสูญเสียเนื้อวัสดุ จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มเวลาต่อชนจาก 4 เป็น 6 วินาที ในขณะที่การสูญเสียเนื้อจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มเวลาต่อชนจาก 6 เป็น 8 วินาที เนื่องจากวัสดุเกิดการเย็นตัวก่อนที่เวลานานเกิน 6 วินาที สำหรับตัวแปรแรงดันและเวลาต่อชนที่ทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมต่อระหว่างเหล็ก SS400 และ S45C ดีที่สุดคือแรงดัน 35 ตัน ที่เวลา 8 วินาที โดยนอกจากมีค่าความแข็งแรงสูงสุดแล้ว ยังมีการฉีกขาดเสียหายแบบเหนียว Cup Cone ที่แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมที่ได้ทั้งความแข็งแรงและความเหนียวควบคู่กัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เอส.บี.-ซีร่า จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุและเครื่องมือสำหรับใช้ในการวิจัย ขอบคุณทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมและพัฒนาการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

มานพ ตันตระบัณฑิตย์. 2544. **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 11. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น (ส.ส.ท.), กรุงเทพฯ.

ศุภชัย นพสุวรรณ. 2546. **การทดสอบวัสดุวิศวกรรม 1**. สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพฯ, กรุงเทพฯ.

องค์การ บุนนาค และ ณฤพล อังคสุวรรณ. 2558. **ผลกระทบของแรงดันและความเร็วรอบในช่วงเสียดทานต่อการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนของเหล็ก SS400 และ S45C**. วิทยานิพนธ์ ปริญญาตรี, ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Shankar, P.S., Kumar L.S., Reddy, N.R. 2013. Experimental investigation and statistical analysis of the friction welding parameters for the copper alloy-$CuZn_{28}$ using TAGUCHI method. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, 2: 155-160.

การติดตามการเจริญเติบโตพืชด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์

The growth of plants tracking based on computer vision.

วิทยา ศรีกุล[1*] ประจวบ อินระวงศ์[2] และ สนั่น จันทร์พรม[1]

Witaya Srigul[1*] Prajuab Inrawong[2] and Sanan Janprom[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาผลการเจริญเติบโตของพืช ได้มีการศึกษาและทดลองเพื่อหาวิธีการที่ดีที่สุดในการปลูกพืช ซึ่งมีงานทดลองและวิจัยเกี่ยวข้องกับงานด้านนี้เป็นจำนวนมาก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการควบคุมสภาวะแวดล้อมที่มีความแตกต่างกัน ในการทดลองจะได้ผลออกมาอย่างไรทุกๆงานจำเป็นต้องมีการวัดและทดสอบ เพื่อหาค่าการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูก วิธีการแบบเดิมที่นิยม เช่น การวัดความสูง วัดขนาดลำต้น ชั่งมวลพืชสดและแห้ง และทำการจดบันทึก แต่ปัจจุบันได้มีการนำเอาหลักการประมวลผลภาพเข้ามาประยุกต์ใช้ในงานติดตามและประเมินผลสัมฤทธิ์ ด้วยเหตุผลเพื่อลดงานของนักวิจัย ลดต้นทุนในการติดตามตรวจสอบ และข้อมูลถูกเก็บตรงเวลา ดังนั้นจึงมีการนำเสนอแนวคิดสร้างระบบการติดตามการเจริญเติบโตของพืชแบบวัดส่วนสูงของพืช และ วัดขนาดพื้นที่ของต้นพืช โดยใช้หลักการประมวลผลภาพ การหาผลรวมภาพขาว ดำ ทางด้านแนวนอน และการหาผลรวมพื้นที่ของภาพ โดยผลที่ได้เป็นข้อมูลการเจริญเติบโต โดยรายงานออกมาเป็นความสูงและพื้นที่ จากการทดสอบพบว่ามีความแม่นยำร้อยละ 100 ดังนั้นจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการบันทึกผล

ABSTRACT

Studying on the growth of plants, there are many experiments and researches relate to the field to obtain the best way of planting. Most of them were to control different environment. In all experimental results, it must measure and test to obtain the growth of those crops. Popular conventional methods such as measuring the height, measuring trunk sizes, measuring mass of fresh and dry plant stems and record results. Nowadays, the applications of image processing techniques are used for monitoring and evaluation of achievement of tasks. The reasons are to decrease researchers tasks, reduce the cost of monitoring and data collection on schedule. Therefore, a system for tracking the growth of plants, measuring the heights and areas, using image processing is proposed. With this method the horizontal black and white image and the sum of the image area are the growth index of plants. The growth presents in points or heights and areas. The test result showed 100 percent accurate, thus it is a suitable method to use as a tool to record the experimental results.

Key Words: seedling growth, image processing, computer vision

* Corresponding author; e-mail address Srigul@hotmail.com

[1]สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

[2]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000

[1]Department of Computer Engineering,Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University, Nakornrajasima 30000

[2]Department of Electrical Engineering,Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University, Nakornrajasima 30000

คำนำ

การเจริญเติบโตของพืชในแต่ละสายพันธ์ นั้นมีรูปแบบที่มีความแตกต่างกันนั่นหมายถึง การเปลี่ยนแปลง ของน้ำหนัก ขนาดของต้นพืช จำนวนใบเลี้ยง หรือขนาดของลำต้น และ อื่นๆ ในการศึกษาการเจริญเติบโตนั้นการวัดมวล การวัดน้ำหนักสดของพืช เป็นวิธีที่นิยมแต่ผลที่ได้ไม่ได้แสดงถึงการเจริญเติบโตที่แท้จริงทั้งหมดเพราะการเปลี่ยนแปลงนั้นมาจากเซลล์พืชเก็บสะสมน้ำนั่นเอง สำหรับอีกวิธีการเป็นการชั่งน้ำหนักแห้งโดยการนำพืชทั้งต้นมาอบให้น้ำระเหยไปจนหมดเหลือแต่น้ำหนักแห้งที่แท้จริง ในวิธีดังกล่าวต้นพืชจะตายจึงต้องปลูกเป็นจำนวนมาก เพื่อเก็บตัวอย่างและเพื่อสุ่มตัวอย่างโดยการเป็นตัวแทนของพืชทั้งหมดในช่วงเวลาต่างๆ สำหรับวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้เป็นการวัดความสูงของพืชซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากเพราะมีความสะดวกในการวัด แต่มีเพียงพืชบางชนิดมีความสูงจำกัด แต่อาจมีบางอย่างมีขนาดเพิ่มขึ้นเช่น ขนาดของลำต้น ดังนั้นในบทความนี้จึงมีวิธีการติดตามการเจริญเติบโตของต้นพืชที่สนใจในสองลักษณะกล่าวคือการวัดการเจริญเติบโตด้านความสูง และการวัดการเจริญเติบโตด้านขนาดของต้นใบ และ ทรงพุ่มที่มีการเติบโตเพิ่มขึ้น เพื่อเป็นเครื่องมืออำนวยความสะดวกในการติดตามและง่ายในการนำมาทดลองหาอัตราการเจริญเติบโตในปัจจัยต่างๆ เช่นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพต่างๆที่มีความหลากหลาย แสงแดดที่ได้รับ อาหารพืช หรือดินที่นำมาปลูกพืช อุณหภูมิ และ ความชื้นที่มีความเหมาะสม และ สภาวะแวดล้อมอื่นๆ ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นการนำเทคโนโลยีด้านการประมวลผลภาพมาช่วยอำนวยความสะดวกในการติดตามการเจริญเติบโตในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่งที่ต้องการศึกษา เช่น วัน สัปดาห์ ตลอดอายุพืช เฉพาะระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบ หรือช่วงเวลาการเจริญเติบโตทางดอกและผล หรือระยะการเจริญพันธุ์โดยให้ผลออกมาที่มีความน่าเชื่อถือ

การวัดความสูง และ การวัดหาค่าพื้นที่ของต้นพืชนั้น สามารถใช้บอกระดับการเจริญเติบโตของพืชได้เป็นการวัดความสูงเหนือพื้นดิน หรือ พื้นที่ของต้นพืชที่อยู่เหนือพื้นดินที่กำลังศึกษา โดยปกติความสูงของต้นพืชการวัดมีการวัดจากส่วนโคนตั้งแต่บริเวณรอยต่อกับส่วนรากขึ้นมาจนถึงปลายยอดใช้เครื่องมือคือไม้บรรทัดและอาจจะติดตามวัดเป็นวัน หรือ รายสัปดาห์ ตามข้อมูลที่ต้องการ ส่วนกรณีวัดขนาดของพุ่มก็อาจใช้สายวัดเพื่อหาขนาดของต้นพืชนั้นๆ

การศึกษาได้มีแนวความคิดที่จะนำการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้กับการติดตามการเจริญเติบโตของต้นพืชเนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวจะสามารถอำนวยความสะดวกให้กับ นักวิจัย และนักพัฒนาพรรณพืช โดยจากการค้นคว้าได้มีการนำการประมวลผลภาพมาใช้เช่นในประเทศไทยก็มีการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายดิจิตอลเพื่อประเมินการเจริญเติบโตโดยใช้ ดัชนีพื้นที่ใบพืชประเภทถั่วเหลืองโดยติดตั้งกล้องในลักษณะภาพมุมสูงมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพเอียงทำมุมกับพื้นประมาณ 45 องศาและเก็บภาพ สามระยะความสูง (รักศักดิ์ เสริมศักดิ์ และ หัสไชย บุญจูง 2007) สำหรับในต่างประเทศได้มีการนำการประมวลผลภาพมาใช้เช่นกัน ตัวอย่าง มีการติดตั้งกล้อง CCD กับแขนด้านหน้ารถแทรกเตอร์เพื่อเก็บภาพการเจริญเติบโตของต้นพืช (Takashi Kataoka 2003) ต่อมาได้มีการสร้างห้องทดลองติดตามผลการเจริญเติบโตพืชแบบสามมิติ โดยใช้กล้องถ่ายภาพสองตัวและแขนกลที่สามารถเคลื่อนที่ตามรางรอบต้นพืชได้เพื่อเก็บภาพต้นพืช (Ayan Chaudhury 2015) ยังได้มีแนวคิดการนำภาพจากกล้องมุมสูงเพื่อถ่ายภาพมุมสูงเป็นการตรวจสอบนับจำนวนใบเลี้ยงแสดงการเจริญเติบโต (Fang Yihang 2015) จากการศึกษาดังกล่าวพบว่ายังมีประเด็นน่าสนใจบางประการที่กล่าวมานั้นยังไม่ได้ถูกนำมาศึกษาเช่น การวัดความสูงหรือหาขนาดของพื้นที่ของพืชที่สนใจศึกษาจึงนำมาสู่ประเด็นศึกษา

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพ

ภาพถ่ายเป็นภาพที่ผ่านการตัดมาจากภาพเคลื่อนไหวโดยใช้ความละเอียดภาพที่ 640×480 จุด โดยมีลักษณะการเก็บภาพตามลักษณะตามกรณีศึกษาโดยกำหนดคาบเวลาขึ้นอยู่กับการกำหนดเงื่อนไขของพืชที่นำมาศึกษาโดยมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพควบคุมสีฉากหลังเป็นสีขาว และกล้องมีระยะห่างจากพืชที่สังเกตการระยะ 30 เซ็นติเมตร

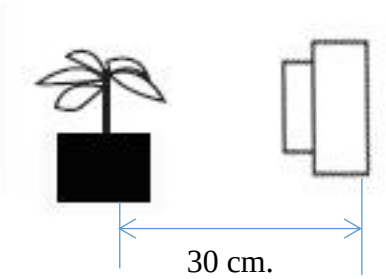


Figure 1 The installation of camera for monitoring the seedling growth

คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติดังนี้ หน่วยประมวลผล Intel core i5 1.7 GHz หน่วยความจำ 4 G Byte ระบบปฏิบัติการ Windows 10 โปรแกรมประมวลผลภาพ MATLAB ภาพถ่ายเป็นภาพนิ่งขนาด 480×640 จุด โดยมีลักษณะการเก็บภาพการกำหนดคาบเวลาขึ้นอยู่กับการกำหนดเงื่อนไขของพืชที่นำมาศึกษาโดยมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพควบคุมสีฉากหลังเป็นสีขาว และ กล้องติดตั้งให้ตั้งฉากกับพื้นสูงระดับต้นพืชโดยมีระยะห่างจากพืชที่สังเกตการ ระยะ 30 เซนติเมตร

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการทดลองโดยใช้กล้องจับภาพการเจริญเติบโตของพืชและบันทึกภาพเป็นช่วงเวลาโดยมีระยะเวลาการบันทึกภาพทุกๆ สองวัน กำหนดให้มีต้นพืชที่ต้องการศึกษา 1 ต้นต่อหลุม กล้องที่ใช้ในการทดลองเป็นกล้องดิจิตอล มีการกำหนดขนาดความละเอียดภาพที่ 480×640 แสดงดังรูปที่ 1 เพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตด้วยภาพถ่าย โดยมีภาพถ่ายตัวอย่างพืชในแต่ละวันดังรูปที่ 2

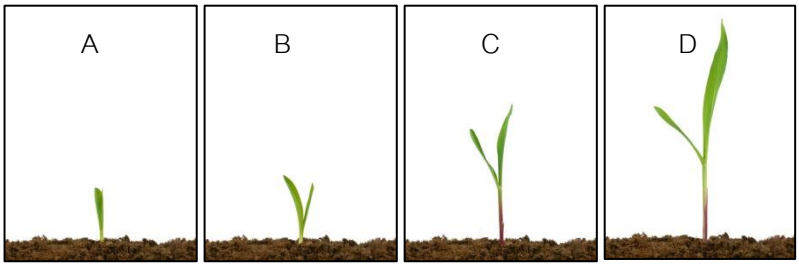


Figure 2 The growth of corn seed.

กระบวนการประมวลผลด้วยภาพดิจิตอลมีขั้นตอนการทำงานโดยเริ่มจากการนำภาพเข้าสู่กระบวนการเตรียมภาพแปลงภาพให้เป็นภาพขาวดำ $(Gray = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B)$ เนื่องมาจากข้อมูลที่ต้องการทราบจากพืชเป็นความสูงหรือขนาดของพืชจึงใช้ภาพที่เป็นภาพสีเทา และ ตัดภาพพื้นที่ส่วนที่เป็นดิน

ออกจากนั้นนำค่าอิสโตรแกรมภาพมาคำนวณหาความเหมาะสมการแปลงภาพเป็นขาวดำและ เพื่อลดขนาดของข้อมูล วิธีการนำเทรชโฮลมาใช้กำหนดจุดขาวและดำที่เหมาะสม $P = 0(\ false) if\ g \le T \,||\, 1(true) if\ g > T)$ เมื่อ P คือทุกๆจุดบนภาพ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3

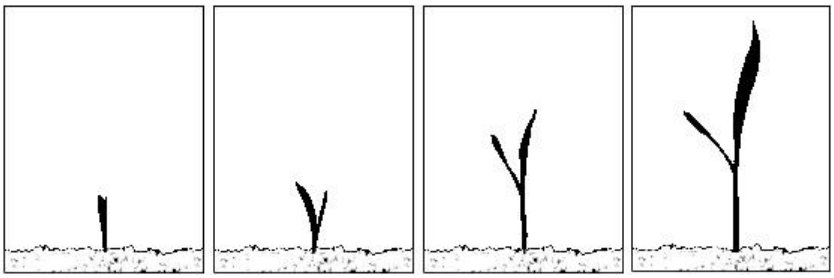


Figure 3 The images convert to black and white.

ขั้นตอนต่อไปคือการทำให้ภาพขาวดำนั้นเป็นภาพผลรวมค่าทางแนวนอน หรือ Horizontal Projection มีวิธีการคำนวณรวมของจุดของภาพทางแนวนอน $H(i) = \sum_j B[i, j]$ (Chanda, B. 1992) โดยหลักการขั้นตอนมีวิธีการคือเริ่มจากวันที่เริ่มทดลองเก็บภาพ ระดับความสูงของดินที่ถ่ายได้จากและประมวลผลด้วย Matlab Script ในลำดับภาพถัดมาพืชเริ่มเจริญเติบโตคำนวณค่าความสูงพืชจากสมการเดิม นำค่าก่อนหน้าความสูงของดิน ลบด้วยค่าจำนวนจุดบนภาพที่ทำการ Horizontal Projection ก็จะได้ค่าความสูงที่เกิดขึ้นโดยคิดเป็นร้อยละ และเก็บลงในฐานข้อมูลความสูงที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นก็จะสามารถติดตามการเจริญเติบโตได้ตามต้องการ และอีกแนวทางหนึ่งในกรณีที่พืชมีการเจริญเติบโตด้านความสูงจำกัดระบบยังสามารถติดตามในรูปแบบของการวัดพื้นที่โดยรวมของทรงพุ่มต้นพืชมีหลักการคำนวณพื้นที่รวมต้นพืช $Area = \sum_i \sum_j B[i, j]$ และจะถูกบันทึกเก็บลงฐานข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายที่ได้ในครั้งถัดไปมีหลักการทำงานดังแสดงในผังงาน

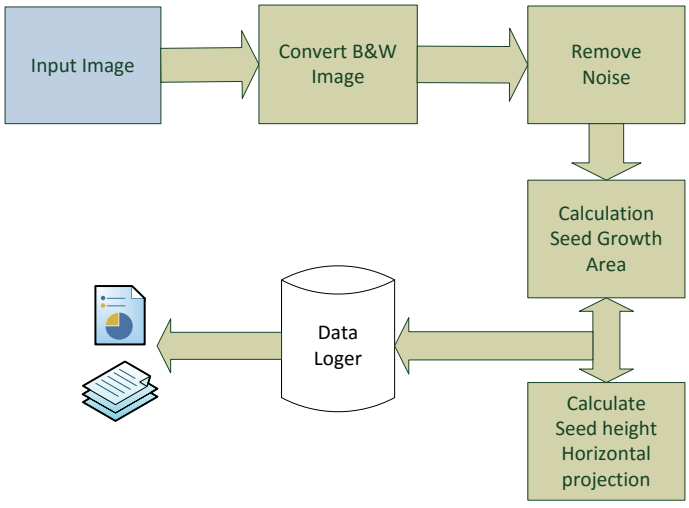


Figure 4 Diagram of Processes

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการใช้ระบบติดตามการเจริญเติบโต

จากการศึกษาผลของการทดลองใช้กล้องติดตามการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ทดลองคือข้าวโพดโดยจุดประสงค์เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการติดตามโดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังในตารางที่ 1 โดยในการทดลองครั้งนี้ได้ปรับความละเอียดของภาพให้มีความละเอียด 100 จุดต่อเซนติเมตร ดังนั้นผลที่ได้เป็นการแปลงจำนวนจุดของภาพให้เป็นหน่วยวัดมาตรฐานเปรียบเทียบวิธีการวัดแบบเดิม กับผลในตารางที่ 1 ของต้นข้าวโพดในการวัดของวันที่ 4 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดได้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยระบบ

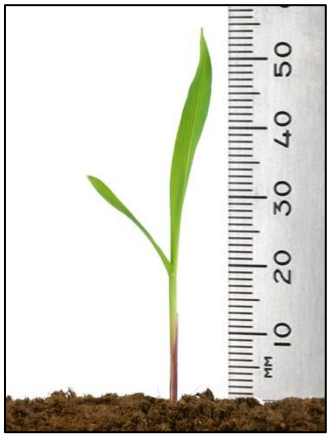


Figure 5 Measurement by ruler

Table 1 Result of plant growth system

Days	Horizontal Projection (Pixel)	Height (cm)	Area (Pixel)
1	134	1.34	1820
2	168	1.68	3174
3	341	3.41	5136
4	554	5.54	11789

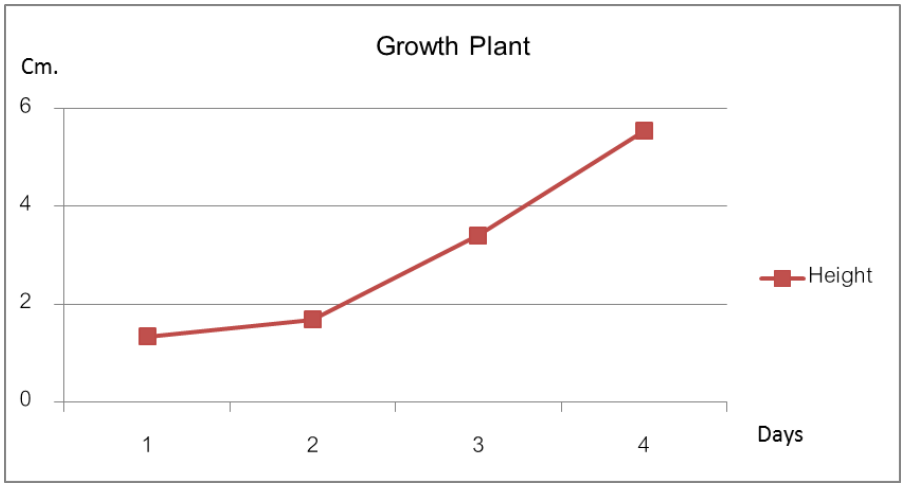


Figure 5 Example chart of growth plant

ในการทดลองได้มีการออกแบบให้ระบบมีการวิเคราะห์และคำนวณผลเป็นสองวิธีการในวิธีการแรกกล่าวดังข้างต้นสำหรับวิธีการต่อมาเป็นการเก็บข้อมูลโดยการวัดขนาดของพื้นที่ของพืชโดยทั้งสองรูปแบบมีจุดประสงค์ของการใช้งานที่แตกต่างกันกล่าวคือ การวัดความสูงสามารถทำได้กับพืชที่มีความเจริญเติบโตไม่จำกัด ส่วนวิธีการที่สองได้ออกแบบเพื่อใช้ทดลองกับพืชที่มีการเติบโตด้านความสูงจำกัดเนื่องมีพืชหลายชนิดที่เจริญเติบโตโดยการแตกหน่อหรือขยายพุ่มไม้นั้นเอง

สรุป

ระบบติดตามการเจริญเติบโตได้ทำการทดสอบกับพืชได้หลากหลายเพื่อใช้วัดอัตราการเจริญเติบโตการงอกของเมล็ดพันธ์พืช โดยมีความสามารถวัดการเจริญเติบโตของพืชจากความสูง และ กรณีที่พืชเป็นพืชที่มีความสูงจำกัดยังสามารถวัดการเจริญเติบโตจากการนับจำนวนจุดบนต้นพืชที่สนใจบนภาพแบบสองมิติ ระบบเหมาะกับการนำไปเป็นเครื่องมือในการทดลองและติดตามความเจริญเติบโต อย่างการเปลี่ยนดิน สภาวะแวดล้อมอากาศ ความชื้น น้ำ และ รูปแบบการให้อาหารพืช ระบบนี้จึงมีการทำงานคล้ายคลึงกับอุปกรณ์ติดตามบันทึกผลการทดลองแบบอัตโนมัติและมีความน่าเชื่อถือดโดยได้ผลการวัดเทียบกับใช้ไม้บรรทัดวัดเท่ากันคิดความเที่ยงตรงเป็นร้อยละ 100

เอกสารอ้างอิง

รักศักดิ์ เสริมศักดิ์ และ หัสไชย บุญจูง 2007 การประยุกต์ใช้ภาพถ่ายดิจิตอลเพื่อประเมินดัชนีพื้นที่ใบของถั่วเหลือง **Suranaree J. Sci. Technology 14** : 163 – 172

Takashi Kataoka , Toshihiro Kaneko, Hiroshi Okamoto, Shun-ichi Hata 2003 Crop Growth Estimation System Using Machine Vision. **International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)** : 1079-1083

Ayan Chaudhury, Christopher Ward, Ali Talasaz, Alexander G. Ivanov, Norman P.A. Huner, Bernard Grodzinski, Rajni V. Patel and John L. Barron 2015 Computer Vision Based Autonomous Robotic System for 3D Plant Growth Measurement **Conference on Computer and Robot Vision 12** : 290-296

Fang Yihang, Wang Xingyu, Sri Pujuan, Lin Chengda, Zhai Ruifang 2015 Automatic identification of two growth stages for rapeseed plant: Three leaf and Four Leaf Stage **International Conference on Agro-Geoinformatics(IEEE) 4** : 148 – 153

Chanda, B.1992 Application of binary morphology to separate overlapped object. **Computer vision, Pattern recognition letters 13** : 639 - 645

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

Subject: Agro-Industry

ภาคบรรยาย

Oral Presentation

Lethality and Quality Evaluation of In-Packaged Ready-To-Eat Cooked Jasmine Rice Subjected to Industrial Continuous Microwave Pasteurization

Thammanoon Auksornsri[1] and Sirichai Songsermpong[1*]

ABSTRACT

The use of pasteurization unit (PU) as a measure of the lethal effect of heating processes and overall quality of ready-to-eat Jasmine rice were determined to compare the conventional and novel microwave technology. Cooked Jasmine rice was packed in polypropylene plastic cup and sealed with a lidding film, then subjected to a continuous microwave system (eight 800 W, 2,450 MHz) and conventional steamer heating. Fiber optic temperature sensor was used to monitor product temperature profiles during processing at the slowest heating point. Pasteurization unit, log reduction (only *Listeria monocytogenes*), microorganism count, color and instrumental textural property were investigated over a 30-day storage period at 8°C. Pasteurization process time reduced from 420 seconds under conventional process to 216 seconds under microwave process for 5-log reduction of *L. monocytogenes*. Microwave heating showed greater effectiveness for shelf life extension of product from 7 days (conventional) to 30 days at 8°C. Cooked rice after heating by microwave was whiter and had lower hardness than conventional heating. This study successfully demonstrates the industrial continuous microwave pasteurization process for producing ready-to-eat Jasmine rice which can apparently reduce process time and extend the shelf life with better product quality than conventional process.

Key Words: Pasteurization, Microwave, Continuous microwave, Ready-to-eat, Rice

* Corresponding author; e-mail address: **fagisrsp@ku.ac.th**

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

INTRODUCTION

Jasmine rice is the most popular rice varieties in Thailand. Owing to its pleasant aroma, white color, soft texture and good eating quality. In Thailand, Jasmine rice is considered as a vital crop for domestic consumers and a primary export commodity for economic growth (Leelayuthsoontorn and Thipayarat, 2006). Ready-to-eat (RTE) foods are a group of food products that are precooked, packaged and ready for consumption without additional preparation step or cooking. The demand for ready-to-eat meals is already very large and is increasing every year. In 2014, ready meals in Thailand achieved retail value growth of 13%, with sales of 5.9 billion Baht, and retail volume growth of 10%, with sales of 35,000 ton (Euromonitor, 2015). RTE foods need to be heat processed to destroy foodborne pathogens that cause of illness and public health concern. *Listeria monocytogenes* is the major concern for refrigerated RTE foods. It was killed by thermal processing. However any post-processing processes may cause cross contamination contributing to the limit of shelf life of product only 5-7 days under chilled conditions. If shelf life of the product could be increased, the production capacity could be increased and hence more revenue (Burfoot *et al*., 1988 and Huang and Hwang, 2012).

Pasteurization is the thermal processing used to destroy foodborne pathogens and undesirable enzymes to make food safe for consumption and enhance storage life. For traditional thermal processing methods, heat is transferred from the heating medium to food interior via convection and then conduction within solid foods or convection within liquid foods (Huang and Hwang, 2012). In RTE foods, the thermal conductivity of the packaging material, entrapped air and the food itself is very low, thus limiting the rate of heat transfer which results in long pasteurization process time and leads to adverse thermal degradation in product qualities (Burfoot *et al*., 1988).

Microwave heating have been widely recognized in the field of food processing. The applications include drying, baking, thawing, tempering, pasteurization and sterilization of foods. The volumetric heat generated by microwaves can overcome the slow rate of heat transfer and reduce 3-5 times of the total heating time from conventional process whereby bacterial destruction is enhanced, but thermal degradation of quality is reduced (Ahmed and Ramaswamy, 2007). Microwave heating has gained popularity due to several advantages such as high heating rates, short heating time, ease of operation, less thermal degradation and superior product quality (Chandrasekaran *et al*., 2013). The application of microwave pasteurization has been largely applied for inactivation of pathogens in fluid and solid foods.

The accumulated lethality was used to reflect the total lethal effect of conventional heat treatment that applied to product and it is expressed as the pasteurization unit (PU). It was offered as a tool for efficiency comparison between conventional and microwave heating. The objectives of this

research were determined the PU value and microorganism count of RTE Jasmine rice after pasteurized by conventional and microwave heating. Also, changes in color, texture and sensory quality of products after heating treatment were studied.

MATERIALS AND METHODS

1. In-packaged RTE Jasmine Rice Preparation

Thai Jasmine rice (*Oryza sativa*) was obtained from C.P. Intertrade Co., Ltd. and stored in airtight containers until used. Jasmine rice 1000 g was cooked by an electric rice cooker (Sharp, Model KS-ZT 18) for 30 minutes with rice to water ratio as 1:1.3. Cooked rice 130 g was packed in polypropylene plastic container (diameter 95 mm, height 45.3 mm, Toyo Seikan Co., Ltd.) and sealed with a cast polypropylene lidding film by a hand sealer machine.

2. Continuous Microwave (MW) System and Conventional (CV) Heating Treatment

In-packaged Jasmine rice was heated in the continuous MW system and CV (Steamer tunnel conveyor belt) heating until the temperature of the sample reached more than 80°C because this temperature has been shown to be adequate for pasteurizing most foodstuffs (Burfoot *et al*., 1988). Nine packaged were treated in each run. The industrial continuous MW system developed by PrimAsia Technology Co., Ltd. was used for the thermal treatment. This system consisted of eight 800 W magnetron, 2450 MHz microwave generators. The cavity was made of stainless steel and its dimensions were 800x4000x1700 mm (WxLxH). MW treatments were performed in 3 heating time as 48 (MW1), 62 (MW2) and 79 (MW3) sec. After heat treatment, samples were holding in cavity with equal time to heating time, after that cooling down immediately by chilled water of 0-4°C for 120 sec until the temperature reached 50°C. For CV steamer tunnel conveyor belt was developed by GEA Co., Ltd. This system used steam as a heating medium for transferred heat to product. Heating time under CV process to sample is 180 sec, then holding 120 sec and cooling down for 120 sec until the temperature of product reach to 50°C. Fiber optic sensors were used to measure the temperatures at the middle of sample-filled containers to obtain time-temperature profiles. After cooling down, samples were kept for 30-day storage at 8°C and analyzed for quality at 0, 7, 14, 21 and 30 day.

3. Pasteurization Units and Log Reduction Calculation

The pasteurization units (PU) corresponding to the microwave and conventionally treated samples were calculated using Eq. (1) with a reference temperature of 80°C and z-value of 13.62°C determined for *L. monocytogenes* from inactivation data under thermal processing

$$PU = \int_0^t 10^{\left[\frac{T(t)-T_{ref}}{Z}\right]} dt \quad (1)$$

Where, t is treatment time (s), T(t) is product temperature at each treatment time (°C), T_{ref} is 80°C, z is temperature sensitivity (°C) for *L. monocytogenes* and dt is time interval (min).

Log reduction stands for 10-fold (one decimal) or 90% reduction in numbers of live microorganism. Log reduction was calculated by Eq. (2)

$$\text{Log reduction} = \frac{PU(T_{ref})}{D(T_{ref})} \quad (2)$$

Where, $PU(T_{ref})$ is comparable time in equal heat treatment at T_{ref} (min) and D (T_{ref}) is time required to kill 90 % of the microorganisms at T_{ref} (Maria *et al*., 2014).

4. Microbial Analysis

Microorganism count in pasteurized rice during storage was investigated by Testing Laboratory of CPF (Thailand) Public Co., Ltd. Type of foodborne pathogens were tested after heat treatment complied with standards for pathogenic microorganisms in food that was announced by The Department of Medical Sciences, Ministry of Public Health, Thailand. The reference methods used were AOAC 990.12 (2012), AOAC 997.02 (2012), AOAC 2003.11 (2012), FDA BAM Online Chapter 16 (2001) and ISO 11290-1:1996/Amd 1:2004. Product under MW2 condition was used to compare quality with product under CV process.

5. Whiteness Measurement

Whiteness of pasteurized rice was measured using a MiniScan XE plus by Hunter Associates Laboratory Inc, USA. Whiteness index (WI) was calculated by Eq. (3). The color parameter was based on CIELAB system of L* (lightness), a* (redness), and b* (yellowness) (Leelayuthsoontorn and Thipayarat, 2006).

$$WI = 100-[(100-L)^2 + a^2 + b^2]^{0.5} \quad (3)$$

6. Texture Analysis

Hardness of pasteurized rice was measured by the Texture Analyzer (TA-XT2i, Stable Micro System, England) using a spherical plate plunger of 35 mm diameter for compression of sample. A 15 g of pasteurized rice was placed inside the beaker of 250 ml and pressed with a 100 g force. Compression distance was 50% strain (Leelayuthsoontorn and Thipayarat, 2006).

7. Statistical Analysis

All experiments were done in triplicate. All data were analyzed using the SPSS of version 15. One-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple-range test at 95% confidence level were applied to evaluate the significance of the changes in different quality attributes.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Effect of MW heating on PU and suppression of the microbial growth

The time-temperature profiles of RTE rice during MW and CV pasteurization treatment are shown in Figure 1. Under MW heating the product reached 80°C within 40 sec, while it took more than 120 sec for the same temperature under CV steamer heating. Table 1 shows process time, PU and log reduction for each of pasteurization treatment. In order to achieve 5-log reduction of *L. monocytogenes* recommended by the USFDA for pasteurized products, CV process required 180 sec for heating and 120 sec for holding time, while MW used only 48-79 sec for heating and additional 48-79 sec for holding time. CV steamer heating has low rate of heat transfer. Thus it took longer process time than MW heating that generated volumetric heating. It is generally believed that short-time processes should produce better quality foods than lengthy processes. Therefore, it indicated that the short processing time of the MW led to considerable higher product quality than CV process (Tang, 2015).

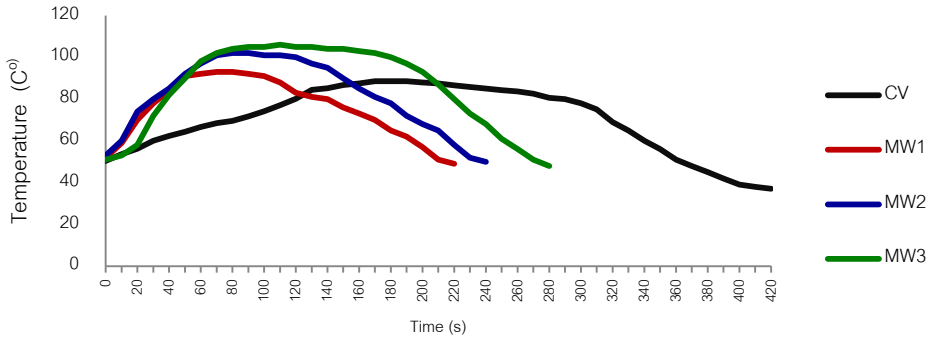


Figure 1 Time-temperature profiles of RTE rice during MW and CV pasteurization process

Table 1 Pasteurization process time, PU and log reduction of each treatment

	CV	MW 1	MW 2	MW 3
Heating time (sec)	180	48	62	79
Holding time (sec)	120	48	62	79
Cooling time (sec)	120	120	120	120
Total time (sec)	420	216	244	278
PU	8.56	9.64	47.66	124.82
Log reduction*	5.12	5.77	28.54	74.74

* Log reduction meant for reduction only *L. monocytogenes*

2. Effect of pasteurization on the microbiological characteristics during storage

Under the food standard regulation, *Clostridium perfringens* and *L. monocytogenes* in the 25 g samples must not be detected and allowed to detect less than 500 cfu of Yeasts and Moulds, 100 cfu of *Staphylococcus aureus* and 10^6 cfu of total plate counts (TPC) per gram of RTE foods tested. Products under CV process detected various microorganisms over standard at 10 days, thus shelf life of the product was 7 days. Current shelf life of chilled meal product is generally limited to 5-7 days as a result of contamination of the raw materials during production and/or from water or air or human. The temperature of the product under MW process reached to 106°C and was stable at high temperature above 90°C for long period of time. High temperature and enough period time of MW process helped suppressing microorganism growth during storage. Thus only TPC was detected in the products during 30-day storage, but the numbers of TPC did not exceed food pathogen standard. All the storage time indicated that product under MW processing had shelf life up to 30 days. Manufacturers of ready-to-eat meal in Europe found that product pasteurized by microwave can increase shelf life to 25-90 days (James and James, 2014).

Table 2 Microorganisms counts during storage

Day	Treat-ments	*L. monocytogenes* *(in 25 g)*	*C. perfringens* *(cfu/g)*	*S. aureus* *(cfu/g)*	*Yeasts & Molds* *(cfu/g)*	*TPC* *(cfu/g)*
0 d	CV	ND	ND	ND	ND	ND
	MW	ND	ND	ND	ND	ND
7 d	CV	ND	ND	ND	ND	4.50E+03
	MW	ND	ND	ND	ND	ND
10 d	CV	2.6E+02	10	ND	1.60E+02	1.9E+06
	MW	ND	ND	ND	ND	1.8E+02
14 d	CV	-	-	-	-	-
	MW	ND	ND	ND	ND	20
21 d	CV	-	-	-	-	-
	MW	ND	ND	ND	ND	3.1E+02
30 d	CV	-	-	-	-	-
	MW	ND	ND	ND	ND	2.40E+03

ND = Not detected

3. Effect of pasteurization on the whiteness index and hardness of cooked rice during storage

The changes in the whiteness index and hardness of pasteurized cooked rice during storage are shown in Table 3. L*, a* and b* value were investigated (data not shown). However, there was no significant difference on color parameters between heating treatments and during storage. Whiteness

index of pasteurized cooked rice under CV process was significantly lower than MW process. Whiteness index of cooked rice decreased with increasing heating time that mainly caused by Maillard reaction and some nutrients pigments leached out during heating process (Parnsakhorn and Noomhorm, 2008). There was no significant difference of whiteness index in all storage time. Color of cooked rice did not change during storage at low temperature.

Hardness of pasteurized cooked rice under MW process was not significantly different with CV process during first seven days. At high temperature and long heating time of CV process may cause retrogradation, resulting in packing of amylose and amylopectin and release of water which lead to higher hardness of cooked rice. This result agrees with a previous report that hardness of cooked rice increased with increasing heating time (Parnsakhorn and Noomhorm, 2008). Increasing storage time significantly increased hardness of all pasteurized cooked rice. The results of various researches revealed that increased storage time led to higher hardness and firmness of cooked rice and decreased stickiness because of an increase in starch retrogradation during storage (Park *et al*., 2012 and Perdon *et al*., 1999).

Table 3 Whiteness index and hardness of pasteurized cooked rice during storage

Properties	Treatments	*0 d*	*7 d*	*14 d*	*21 d*	*30 d*
WI	CV	21.68^{a}	21.49^{a}	$(21.68^{a})^{*}$	$(21.68^{a})^{*}$	$(21.68^{a})^{*}$
	MW 1	$23.64^{b,A}$	$23.39^{b,A}$	$22.96^{b,A}$	$23.27^{b,A}$	$22.64^{b,A}$
	MW 2	$23.41^{b,A}$	$23.21^{b,A}$	$23.14^{b,A}$	$23.19^{b,A}$	$22.57^{b,A}$
	MW 3	$23.38^{b,A}$	$23.30^{b,A}$	$23.12^{b,A}$	$22.89^{ab,A}$	$22.45^{b,A}$
Hardness (Newton)	CV	14.67^{a}	16.28^{b}	$(14.67^{a})^{*}$	$(14.67^{a})^{*}$	$(14.67^{a})^{*}$
	MW 1	$13.48^{a,A}$	$15.58^{ab,B}$	$17.34^{b,C}$	$17.64^{b,C}$	$20.60^{b,D}$
	MW 2	$13.66^{a,A}$	$14.98^{a,B}$	$17.85^{b,C}$	$16.70^{b,C}$	$23.31^{d,D}$
	MW 3	$14.63^{b,A}$	$16.16^{b,B}$	$18.26^{b,C}$	$19.20^{c,C}$	$22.00^{c,D}$

Different lowercase letters show differences between heating treatments, Different uppercase letters show differences between storage times.
( ) are data of product under CV process at 0 day used for comparing with products under MW process because product under CV process was destroyed after 10-day storage.*

CONCLUSION

The MW heat-treated RTE Jasmine rice method could reduce heating time by half of conventional steamer method to accomplish the same log reduction. MW 2 was the best condition for pasteurized RTE rice because this condition was considered as the ultra-pasteurization process that used ultra-high temperature, short time and rapidly cooling which created the best quality and extended shelf-life of product. Pasteurization by MW had great effectiveness to suppress growth of pathogenic microorganisms. Extension of shelf life of the product could increase from 7 days to 30

days. Microwave pasteurized RTE rice have the advantages of retaining color and texture throughout the shelf life. Finally, the use of industrial continuous MW system represented a great alternative to conventional pasteurization.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by grants from The Thailand Research Fund (TRF) and CPF (Thailand) Public Company Limited under “Research and Researchers for Industry Program (RRI)”.

REFERENCES

Ahmed, J. and H.S. Ramaswamy. 2007. Microwave pasteurization and sterilization of foods. pp. 691-711. *In* M.S. Rahman, ed. **Handbook of Food Preservation**. CRC press. London.

Burfoot, D., W.J. Griffin, and S.J. James. 1988. Microwave pasteurisation of prepared meals. **Journal of Food Engineering** 8: 145-156.

Chandrasekaran, S., S. Ramanathan and T. Basak. 2013. Microwave food processing-A review. **Food Research International** 52: 243-261.

Euromonitor International. 2015. **Ready Meals in Thailand**. Available Source: http://www.euromonitor.com/ready-meals-in-thailand/report, October 20, 2015.

Huang, L. and C.A. Hwang. 2012. In-package pasteurization of ready-to-eat meat and poultry products. pp. 437-450. *In* J.P. Kerry, ed. **Advances in Meat, Poultry and Seafood Packaging**. Woodhead Publishers, London.

James, S. and C. James. 2014. Minimal processing of ready meals. pp. 599-612. *In* D.W. Sun, ed. **Emerging Technologies for Food Processing**. Elsevier Ltd., New York.

Leelayuthsoontorn, P. and A. Thipayarat. 2006. Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions. **Food Chemistry** 96: 606-613.

Maria, B.T., M.N. Nuria and D. Rodrigo. 2014. Impact of temperature on lethality of kiwifruit puree pasteurization by thermal and microwave processing. **Food Control** 35: 22-25.

Park, C.E., Y.S. Kim, K.J. Park and B.K. Kim. 2012. Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. **Journal of Stored Products Research** 48: 25-29.

Parnsakhorn, S. and A. Noomhorm. 2008. Changes in physicochemical properties of parboiled brown rice during heat treatment. **Agricultural Engineering International** 10: 1-20.

Perdon, A.A., T.J. Siebenmorgen, R.W. Buescher and E.E. Gbur. 1999. Starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage. **Journal of Food Science** 64 (5): 828-832.

Tang, J. 2015. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality. **Journal of Food Science** 80 (8): 1776-1793.

Distribution Channel of Imported Halal Foods to Jakarta, Indonesia

Megita Ryanjani Tanuputri[1*], Ravipim Chaveesuk[1], and Adi Djoko Guritno[2]

ABSTRACT

In-depth interview and IDEF0 diagram of a business process of major stakeholders in the supply chain of imported halal foods to Jakarta are used to identify key issues and to develop some notifications for both government and private sectors. Indonesian government should set a priority in improving port and road conditions in the Java Island to enhance long-term national logistics performance and to reduce both dwelling and distribution time, strengthening and develop integrated national single window with all related departments such as Indonesian Food and Drugs Administration (BPOM), The Council of Indonesian Ulama (MUI), quarantine, customs and port in order to prevent overlapping activities, long processing time and unofficial costs. At the same time, developing good communication between importers and manufacturers to accommodate customer's needs and demand and to avoid misunderstanding, while minimizing time and cost during both pre-clearance and clearance must be encouraged. Coordination among importers, freight forwarders, 3PLs, and warehousing service providers using warehouse management and IT system is necessary to prevent the demurrage risk at the port. Distributors and retailers should enhance their information sharing to improve the distribution efficiency. Lack of a cold chain system may give chance for an investment from international cold chain corporation.

Key Words: Imported Halal Foods, Logistics Performances, Supply Chain, IDEF0 Diagram, Business Process

*Corresponding author; e-mail address; **megita.ryanjani@yahoo.com**

[1] Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[2] Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agricultural Technology, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281

INTRODUCTION

Integrated supply chain is needed to build a collaboration among all stakeholders within the supply chain, while integrated logistics serves to link and synchronize overall supply chain as a continuous process and is essential for an effective supply chain connectivity (Bowersox et al., 2013). Indonesia is one of the countries with high logistics cost around 23.6% of GDP (Jakarta Post, 2014). Major logistics issues in Indonesia are inadequate infrastructure, poor export and import lead time, and bottleneck in the port service. Logistics Performance Index (LPI) rank of Indonesia was 53rd in 2014 compared to Malaysia in 25th, Thailand in 35th and Vietnam in 48th (World Bank, 2014). Cost to import in Indonesia was stable at 646.80 US$ per 20ft container in 2014 which was higher than Malaysia (560 US$) and Vietnam (600 US$) but lower than Thailand (760 US$). These costs include cost for documents, administrative fees for customs clearance and technical control, customs broker fees, terminal handling charges and inland transport (World Bank, 2015).

For an archipelago with around 17,000 islands, Indonesia is passed by the Sea Lane of Communication (SLoC) which gives a direct access to the largest market in the world and global container shipping line. Indonesia ranks 4th in the world in terms of its population with more than 249.9 million people, leading to a high food consumption. Moreover, middle and upper income class of Indonesians are growing as shown by high growth of sales of canned food, chilled processed food and frozen processed food (USDA Foreign Agricultural Service, 2014). High food consumption and instability of local production may lead to insufficient food supply and ignite import activity. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2012) stated that 83.8% of international container volume is concentrated in Java Island, while Tanjung Priok port, Jakarta accounts for approximately 63.8% of the international container volume throughout Java Island. This research will investigate the distribution system of imported halal foods to Jakarta by analyzing the stakeholders along the supply chain through their business process. Recommendation can thus be developed to improve the effectiveness of the distribution system.

MATERIALS AND METHODS

This research focuses on the distribution system of imported halal foods to Jakarta, Indonesia.

1. A secondary data on the distribution system of imported halal foods is collected to identify a supply chain structure of imported halal foods to Jakarta, Indonesia.
2. Carry out an in-depth interview for the following stakeholders along the supply chain
   2.1. Importers
   2.2. Tanjung Priok Port, Jakarta
   2.3. Freight Forwarders (FFs)
   2.4. Third-Party Logistics (3PLs)

2.5. Distributors

2.6. Retailers

3. Analyze the business process from each stakeholder using the IDEF0 Diagram by

3.1. Identify the main activity

3.2. Determine input, control, mechanism, and output of each main activity

3.3. Link the flow of information and product in each activity

4. Identify issues in each stakeholder based on the in-depth interview and the IDEF0 diagram

5. Give a recommendation to improve the effectiveness of the distribution system

RESULTS AND DISCUSSION

1. Supply Chain Structure of Imported Halal Foods to Jakarta, Indonesia

Main stakeholders in supply chain of imported halal foods to Jakarta include importer, FF, 3PL, distributor, sub-distributor and retailer (Figure 1). It was observed that overseas company mostly used third parties such as FF and 3PL to accelerate and manage their logistics activities, especially with customs clearance and quarantine at the port as mentioned in Pujawan and Mahendrawathi (2010). The role of each stakeholder may be different from one distribution model to another which depends on the type of product, product volume and its level of urgency. The type of product affects the role of the distributor, for example imported cooking spices for a restaurant is distributed by a FF not a distributor, while in fast moving consumer goods (FMCGs) either main distributor or sub-distributor are required for helping the importer. The product volume will dictate whether a full container load (FCL) or a less container load (LCL) is required as well as a size of a forwarder being chosen. The level of urgency relates to the freight decision. Instead of sea freight, a product with high level of urgency will be distributed by an air freight.

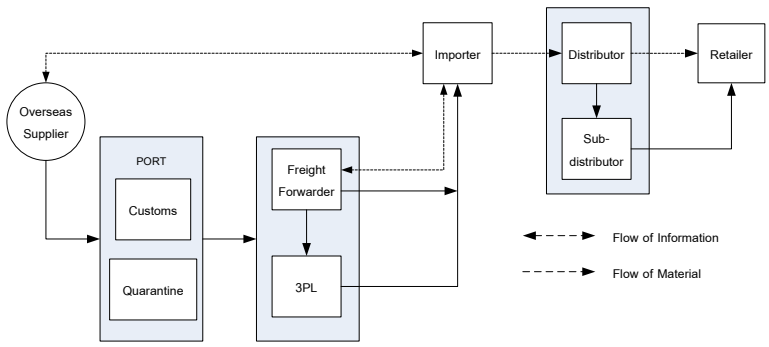


Figure 1. General Supply chain of imported halal foods to Jakarta, Indonesia

Supply chain starts from an importer who owns import licenses and places an order for particular imported foods to the overseas supplier or exporter. Some FFs own import licenses and act as importers for all customs and Indonesian Food and Drugs Administration (BPOM) issues, while many importers technically give an authority to the FF for preparing the document required, handling customs clearance and quarantine, and delivering the product to the importer's warehouse or

appointed place. In some cases, the FF will hire the 3PL or transporter for the delivery task. Furthermore, the importer will delegate a specific distributor to distribute the products to the modern retail stores throughout Indonesia. In this case, the distribution can be carried out either by a main distributor only or sub-distributors. Product distribution to outside big city in Java needs a sub-distributor available in that particular area. Many importers also act as the distributors, exclusive agents or consolidators and have offices or local distributor in major cities of Java Island. In addition, few retailers are also importers but they are not responsible for any logistics activities. Generally, the imported products move to distributor warehouse in a hub city, then come to sub-distributors before delivering to retailers as shown in Figure 2.

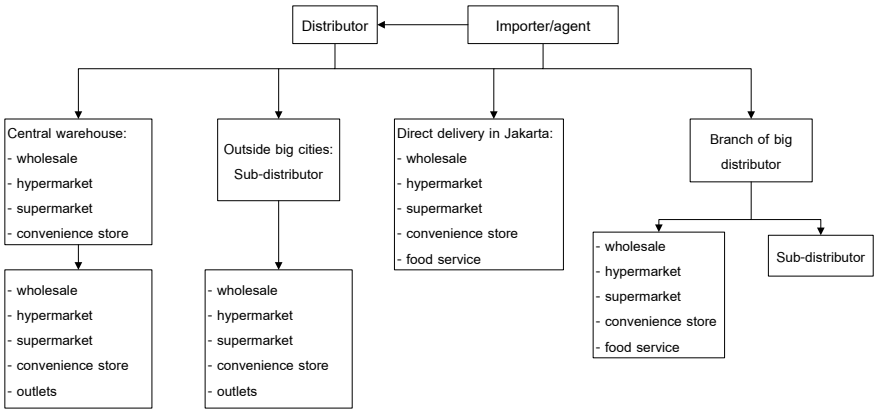


Figure 2. Distribution channel for imported products

2. Business Process of Each Stakeholder

2.1. Importers (Activities A1 - A3)

Figure 3 displays a business process of an importer which consists of preparing initial document, ordering and shipping. Based on Presidential Decree No. 10 Year 2008, Indonesia has officially applied Indonesia National Single Window (INSW) as a national electronic system to improve an efficiency of a flow of goods and customs through the port. Based on an in-depth interviews, some stakeholders state that INSW helps accelerate the importing process and reduces transaction cost including unofficial cost. However, for an activity of applying ML number (product number for imported products), it may take 14 days to 2 years because of inadequate samples received by an importer and BPOM and lack of required documents. Moreover, shipment booking and product volume being shipped should be taken into importer's consideration to reduce the cost and shipping time which takes 7 days on average from Lam Chabang port, Thailand to Tanjung Priok port, Jakarta. Since the importer orders the product through the trader not directly from the manufacturer, it is difficult to communicate the market need and demand directly to the manufacturer. In addition, some proposals from importers to co-promote the products with the traders or manufacturers are turned down or ignored.

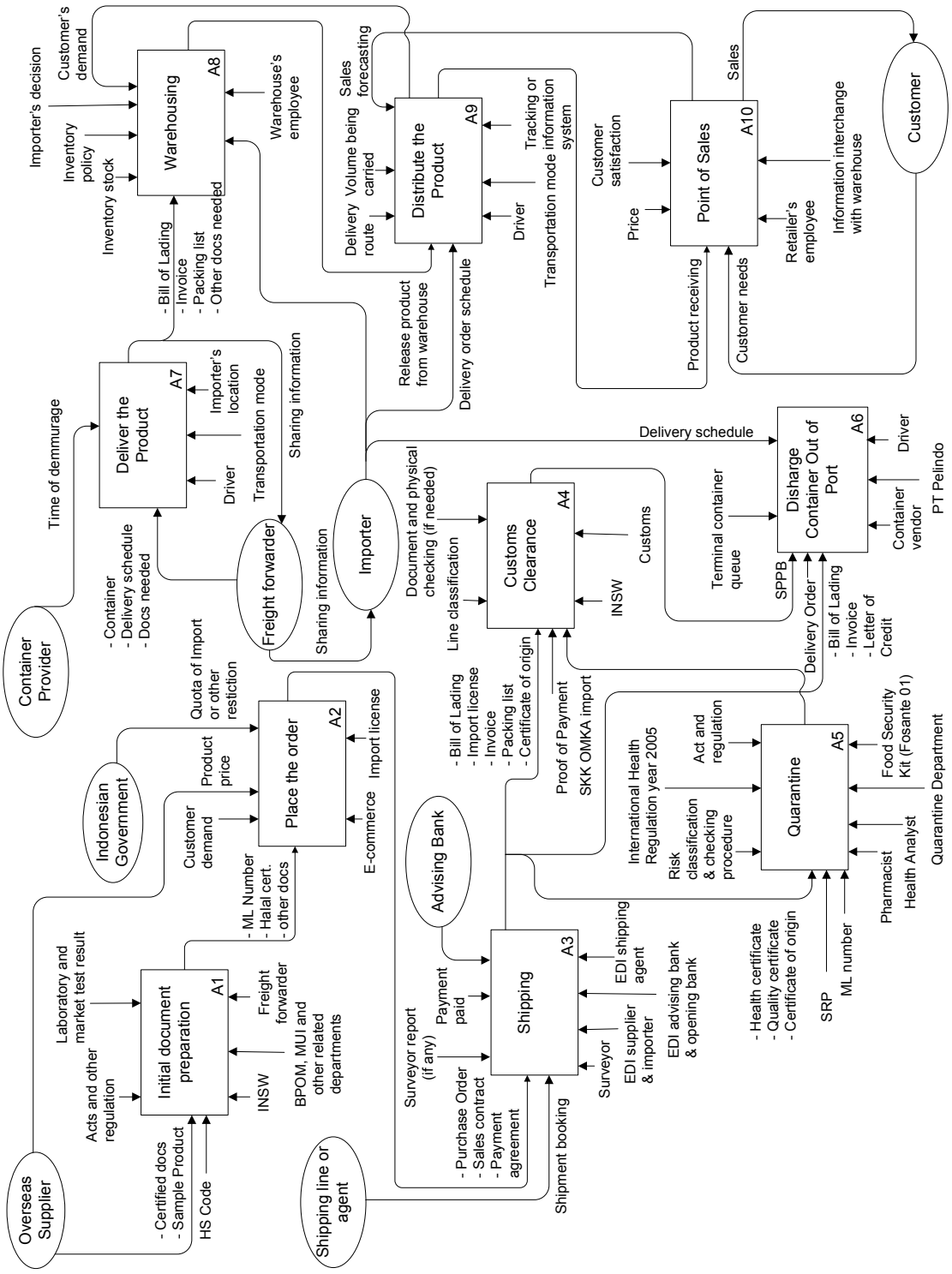


Figure 3. Business process of all stakeholders

2.2. Tanjung Priok Port, Jakarta (Activities A4 and A5)

After the container arrives at the port, it will be moved to a quarantine unit and requires several documents such as ML number from BPOM, health certificate, halal certificate from The Council of Indonesian Ulama (MUI), quality certificate and certificate of origin to be checked. Retailed food products with other countries halal logo are not allowed in retail stores and may delay the processing time at the port. Furthermore, applying for a halal logo from MUI may take from 3 months to 2 years. Halal logo is not mandatory now, but may be enforced in 2019. The quarantine unit classifies the products based on the risk as low, middle and high. Low risk products include processed foods which are released at once the documents are completely submitted. Medium risk products are primary processing products that require detailed review of all documents (2-4 days), while high risk products including vegetable, fruit and live animal will require deeper inspection on either documents or laboratory and it may take 4-5 days before the quarantine release of SKK OMKA import (Certificate of health for imported food, drugs and cosmetic). This document is required for the customs clearance besides the import licenses, invoice and packing list. Customs also classifies the clearance line into green (5-7 minutes), yellow ($\leq$ 4 days) and red (4-5 days) based on the risk of products and import history. Green zone is for the product with a good import history, while yellow zone is for the general product and red zone is for the new item, controlled goods or bad import history goods. The importer should pay all taxes and duties before a customs release of SPPB (A letter of approval to release the goods) and shipping line agent can then discharge the containers out of the port.

2.3. Freight Forwarder (Activities A4 - A6)

Generally, a large FF will facilitate the communication between an importer and an exporter in terms of documents required. The FF can access and help the importer to prepare the documents by INSW which provides a feedback to the importer and the FF as users. In some short shipping distance cases, even though the product already arrives at the port, original documents such as Bill of Lading for customs clearance from the exporter have not arrived yet. This delay can keep the products in the port longer and incurs a higher cost. In addition, there is an overlap activity between the customs clearance and the quarantine unit when the quarantine requests a stringent check and it ends up with container being opened twice which is inefficient and takes longer time. A survey indicates that an average time for the FF to get the SPPB after the container arrival is 4.62 days for the green zone. Nevertheless, a good relationship between the FFs and customs or quarantine staffs and a good reputation of the FF and the importer can help reduce those processing time. Without the FF, average time at the port can range from 7-30 days. With the FF, dwelling time in the port was between 5-8 days during 2011 to 2013. In some cases, even though a SPPB release of the product has been issued, there might be a long terminal container queue for discharging container out and thus leading

to longer dwelling time and costly demurrage risk. It is observed that a perfect order fulfilment rate of the FFs in Jakarta is around 60-90%.

2.4. Third-Party Logistics (3PL) (Activities A7 and A8)

The 3PLs in this distribution system are either transporters or warehousing service providers. Large FFs own trailers or trucks for delivering the products to an appointed place, while others hire transporters. The warehousing service providers may rent their warehouse to the importers or help the importers maintain their warehouses. It is apparent that the FFs, 3PLs, warehousing service providers and importers must well-coordinated for an efficient distribution. If a space in the importer's warehouse is not available, an instruction is given to keep the products in the port or deliver to the FF's or 3PL's warehouses. Large importers and import-export based firms have employed advanced information technology (IT) for inventory management in their warehouses. Large transporters provide global positioning system (GPS) for their competitive advantage, while medium and small FFs lack of this tracking system. General 3PLs still lack of a cold chain system. Major logistics cost for 3PLs is a transportation cost and a congestion around Tanjung Priok port can be very costly. Transporters can make only one trip/day from the port to any destination regardless of the distance, while many transporters prefer working during night time. Nevertheless, the road congestions in Java also lead to high transportation costs, for example, from the port to a close city such as Cikarang (55.4 km) may cost 750 US$ for 20ft container while 56.4 km from Pasir Gudang to Tanjung Pelepas, Malaysia costs only 450 US$ for 20ft container. As for the halal packaged food products, they are delivered using the same truck as non halal foods but in different section or area.

2.5. Distributor (Activity A9)

The distributor must coordinate with the importer, warehousing service provider, and retailer. A distribution can be a pull system which depends on the demand from the retailer or a push system which is based on the importer's decision or mix between both. The main factors under consideration are the product volume and the route to retailers that determine a transportation mode being used. The sub-distributors do not provide a cold chain system and an advance tracking system as the main distributor. Email and phone are their communication and tracking methods. The large importers who need a cold chain systems will expand their business to be the distributor in order to facilitate their needs, or hire the specific cold chain transporters or distributors. Limitation in the distribution is lack of labor for a remote area. Halal and non Halal products are observed to share the same warehouse.

2.6. Retailer (Activity A10)

Most imported products are sold through a modern trade such as hypermarket, supermarket and convenience stores. Their retail store value is approximately at 115 million US$ (1,628 thousand millions IDR) and 60% of those values is food and beverages (USDA, 2014). For general hypermarket and supermarket, target customers are a middle-low income who buy in large a volume but with a low

frequency and are price sensitive. They mainly carry mass products with some imported foods. Non halal foods are separately shelved with identified tags. Their marketing strategies are to present the product with good price and price reduction. High-end supermarket's target are middle-high income customers and expatriates who buy in a small volume but with a high frequency and are not price sensitive. A wide variety of imported foods are available which also depends on the store locations. Non halal food products are shelved separately. Their marketing strategies are to present product's freshness and premium quality or exclusive products with good service. Target customers for a convenience store are middle class who buy in a small amount but with a high frequency and are not price sensitive while demanding convenience. Mass products are major items with few imported foods. Alfamart, the second largest convenience store (9,187 stores) in Indonesia, does not carry non halal food items. Their strategies are to expand more branches to get higher access from consumer and market. Seventy percent of the convenience store is owned by the company while 30% is franchise ownership. Moreover, a margin for the modern retail in Indonesia is around 18-19%. To increase the customer's satisfaction, the retailers should coordinate with the distributor and their warehouse service provider about a product procurement. Retailers point out that the halal logo is important to some Muslim, however high-end consumers do not emphasize on that because they have high education that allows them to analyze from the product label or detailed communication.

CONCLUSION

Major issues in this research related to government agencies include long time in applying ML number and halal logo, long and inconsistent clearance processing time in the port by customs and quarantine units stemming from the unintegrated INSW system. Moreover, port congestion and poor road conditions in Java Island increase the dwelling and distribution time. As a consequence, Indonesian government should set a priority in improving the infrastructure of the port and road, and strengthening INSW by integrating INSW with all related departments such as BPOM, MUI, quarantine, customs and port to avoid overlapping activities, long processing time and unofficial costs. Major issues from the private stakeholders are lack of close and direct coordination between importers and manufacturers or traders in terms of customer demand management and long-term strategic marketing plan, lack of good coordination among importer-3PL-FF-warehouse service provider, shortage of labor for the distributor in small and remote cities, lack of good communication between distribution and retailers via IT systems for delivery and inventory management, and lack of cold chain and tracking system for 3PL and small and medium distributors. Therefore, the following must be instilled: strengthening the good communication between the importer and the manufacturer to accommodate their customer's needs and demand, to avoid misunderstanding and to minimize

time and cost for both pre-clearance and clearance process. A coordination among importer-FF-3PL-warehousing service provider via IT system is necessary to prevent the demurrage risk. Sharing information between distributors and retailers is encouraged to improve their distribution efficiency. Inadequate cold chain system may give an opportunity for an international cold chain corporation to fill in.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from National Research Council of Thailand and the Thailand Research Funds were gratefully acknowledged.

REFERENCES

Bowersox D.J., D.J. Closs, M.B. Cooper, J.C. Bowersox. 2013. **Supply Chain Logistics Management Fourth Edition**. Singapore: Mc-Graw Hill.

Jakarta Post. 2014. High Logistics Cost Still Harming RI Competitiveness. Available source: http://www.thejakartapost.com/news/2014/03/18/high-logistics-costs-still-harming-ri-competitiveness.html , November 14 2015

OECD. 2012. **Regulatory and Competition Issues in Ports, Rail and Shipping in Indonesia**. OECD Reviews of Regulatory Reform.

Pujawan, I. N. and Mahendrawathi E.R. 2010. **Supply Chain Management. Indonesia**: Guna Widya Publishing

USDA Foreign Agricultural Service. 2014. **Global Agricultural Information Network Report: Indonesia Retail Foods 2014**

World Bank. 2014. **LPI Global Rankings 2014**. Available source: http://lpi.worldbank.org/international/global , April 14 2015

World Bank. 2015. **Cost to Import**. Available source: http://data.worldbank.org/indicator/IC.IMP.COST.CD , November 14 2015

Production of freeze-dried Mao juice powders and their functional properties

Wetanee Suravanichnirachorn[1], Withida Chantrapornchai[1*], Vichai Haruthaithanasan[1], Suntaree Suwonsichon[1], Udomlak Sukatta[2] and Thanapoom Maneeboon[3]

ABSTRACT

One of the major problems in drying fruit juice is stickiness due to its high hygroscopicity. Thus, carrier agents were added into juice before drying for improving its properties. In this study, 35% w/w of maltodextrin, gum arabic and maltodextrin:gum arabic (1:1) were added into Mao fruit juices before passing the mixtures through freeze–dried process for 30 h. The Mao juice powders containing all carrier types had purple color and low water activity but moisture content and solubility time were significantly different ($p \leq 0.05$). Mao juice powder with maltodextrin had the lowest moisture content (3.53 ± 0.62 %) and solubility time (131.78 ± 2.34 second). Mao juice powders had total anthocyanin content between 2.31 – 2.63 mg·g fw and analysis using HPLC revealed that the major component was delphinidin. The antioxidant activities of Mao juice powder were investigated using DPPH, ABTS, FRAP and nitric oxide assays. The results showed that among all treatments, they have fairly similar antioxidant activity in FRAP assay ($p > 0.05$). However considering ABTS assay, the one with maltodextrin seemed to be a better antioxidant activities ($p \leq 0.05$).

Key Words: anthocyanin, freeze drying, Mao, maltodextrin, gum arabic

* Corresponding author; e-mail address: withida.c@ku.ac.th

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[2]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand.

[3]Scientific Equipment and Research Division, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand.

INTRODUCTION

Anthocyanins are phytochemicals which widely used in functional foods due to their several health benefits. They have been used for therapeutic treatments for diabetes, retinopathy, vision disorders and age-related diseases such as hypertension and heart failure. Moreover, they could enhance immune system, anti-inflammatory and anti-cancer activities (Motohashi and Sakagami, 2008).

Mao fruits are mostly found in the Northeast of Thailand such as Sakon Nakhon, Udon Thani, Loei, Nong Khai and Nakon Phanom (Butkhup and Samappito, 2008). They had good antioxidant capacity due to its high content of anthocyanin and phenolic compounds (Samappito and Butkhup, 2008; Musika and Sae-eaw, 2013).

Freeze drying is a technique which favorable to a materials that easily deteriorated by heat. However, drying of fruit juices with high sugar content usually yields sticky and high agglomerates as sugar transforms into crystalline sugar at amorphous state through adsorption of small amounts of water resulting in high hygroscopic property. Hence, addition of some carriers in the mixtures could be useful (Cano-Chauca *et al*., 2005; Martinelli *et al*., 2007). Maltodextrin and gum arabic are carrier agents which mostly used in drying process for improving characteristic and extending shelf life of the powders, since they are highly water soluble and give low viscosity. Maltodextrins are oligosaccharides produced by hydrolysis of starch. Their properties depend on dextrose equivalent (DE) (Langrish *et al*, 2007). Gum arabic is a complex hetero-polysaccharide, it has good emulsifying capacity and low viscosity (Martinelli *et al*., 2007). Moreover, it is more expensive than maltodextrins.

In this study, we aimed to study physical properties, structure, anthocyanin content and their antioxidant activities (DPPH, ABTS, FRAP and Nitric oxide assay) of Mao juice powders were added with maltodextrin, gum arbic and maltodextrin:gum arabic (1:1)

MATERIALS AND METHODS

1. Preparation of Mao fruit powder with different carrier types.

Fresh Mao fruits were purchased from Loei province, Thailand. The fruits with dark red and purple color were selected, sealed in plastic bags and kept in a freezer at -18°C. Before investigation, Mao fruits were thawed overnight at 4°C, washed with water to remove remaining sand, dirt and to reduce the initial microbial load, soaked with chlorine 50 ppm for 30 min and washed with water again. The Mao juices were squeezed from cleaned Mao fruits using juice extractor (GS 1000, Green Star, USA). Three different carrier types (maltodextrin DE 10 (Thai food and chemical, Thailand); gum arabic (Chemipan, Thailand); and the blend of maltodextrin and gum arabic (1:1)) were mixed into the juices at 35% w/w. The mixtures were freeze-dried using a freeze dryer (Supermodulyo-230 Thermo Scientific, USA) at -50°C for 30 h. Mao juice powders were ground before transferring to aluminum foil bags.

2. Determination of Mao juice powder qualities (color, water activity, moisture content, solubility time and structure)

The color values in CIE $L^*C^*h^\circ$ system were measured in reflectance mode using spectrophotometer Minolta CM-3500d (Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan), under a standard

illuminant D_{65}, standard observer 10º. The water activity (a_w) was determined by Aqua Lab (Series 3 TE, Decagon Devices, USA). The moisture content was analyzed according to a method in A.O.A.C. (2000). The powder structure were analyzed by scanning electron microscopy (JSM-5600LV, JEOL, Japan), operated at 10 kV with a working-distance of 10 mm. The solubility time was determined using a method modified from Goual *et al*. (2007). The powder 2 g and 50 mL distilled water were added to glass beaker 250 mL. The mixture was agitated with a magnetic stirrer (C-MAG HS 7, IKA, Germany) at position 2. The times for dissolving powder completely were obtained.

3. Determination of anthocyanin content

Determination of total anthocyanin content (TAC)

The TAC was determined by the pH-differential method (Worsltad *et al*., 2005). Absorbance was measured by a spectrophotometer-UV/VIS UVmini-1240 (Shimadzu, Japan) at 510 and 700 nm. Distilled water was used as blank. The TAC was calculated using Eq. (1) and expressed as cyanidin-3-glucoside in mg·g sample^{-1}.

$$\text{Total anthocyanins (mg/L)} = \frac{A \times MW \times DF \times 1000}{\varepsilon \times l} \quad (1)$$

where A is absorbance = $(A_{510} - A_{700})_{pH\ 1.0}$- $(A_{510} - A_{700})_{pH\ 4.5}$, ε is cyanidin-3-glucoside molar absorbance (26900 L· (cm·mg)$^{-1}$), l is the cell path length (1 cm), MW is the molecular weight (449.2 g·L^{-1}) and DF is the dilution factor.

Determination of individual anthocyanin by High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

Cyanidin-3-o-glucoside, Delphinidin, Pelargonidin and Malvidin were quantified by HPLC (Shimadzu, Japan) with an Inertsil ODS-3 C_{18} packed column (ID 5 µm, 250×4.6 mm). The HPLC analysis method used in this study was modified from the method of Salazar-González (2012). The acetonitrile: 4.5% formic acid were applied in a rate of 1.5 mL·min^{-1} at proportions of 10:90, 13:87 and 100:0 during 0, 11, and 21 minutes, respectively, and measured at 520 nm. A standard solution of individual anthocyanins, suspended in ethanol:water (50:50), was injected to evaluate the area under the curve corresponding to 50-250 µg·mL^{-1} of anthocyanin. This area was used to correlate the area observed on the chromatogram to calculate the amount of individual anthocyanins corresponding to individual anthocyanins.

4. Determination of antioxidant activity

Many assays have been introduced to measure antioxidant capacity, each assay had different mechanisms. Antioxidant activities of Mao juice powders were determined using DPPH, ABTS, FRAP and Nitric oxide assays and compared with butylated hydroxytoluene (BHT), vitamin E and vitamin C.

DPPH free radical scavenging activity

The DPPH (1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl) assay was slightly modified form Floegel *et al.* (2011). A solution of 1 mM DPPH in methanol:water (80:20) was stirred for 40 min. The DPPH solution was diluted with 80% methanol to an absorbance of 0.700 ± 0.02 at 517 nm. Then, the DPPH solution 2.95 mL and diluted Mao juice powders solution (five different dilutions) 0.5 mL was added to a test tube. The mixture was shaken and kept in the dark for 30 min. The absorbance was measured at 517 nm using spectrophotometer. The results were calculated as percentage of free radical scavenging using Eq. (2).

$$\% \text{ DPPH inhibition} = \frac{[(Ac\text{-Abc})\text{-}(\text{As-Abs})]}{(Ac-Abc)} \times 100 \qquad (2)$$

where *Ac*, *Abc*, *As* and *Abs* are the absorbance of the control, the blank control, the sample and the blank sample, respectively.

IC_{50} value, a concentration of the sample required to inhibit 50% of radical, was calculated in $mg{\cdot}mL^{-1}$ using an equation from a plot of %scavenging vs. concentration of Mao juice powders.

ABTS free radical scavenging activity

The method for investigating ABTS [2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)] radical cation scavenging activity was modified from Re *et al*. (1999). The ABTS radical cation was generated by mixing 7 mM ABTS:2.45 mM potassium persulfate solution at proportions of 2:1 and kept in the dark and refrigerated for 12–16 h. The ABTS solution was diluted with ethanol to an absorbance of 0.700 ± 0.02 at 734 nm. The ABTS solution 2 mL and diluted Mao juice powders solution (five different dilutions) 20 µL was added to a test tube. The mixture was shaken and kept for 6 min in the dark. The absorbance was measured at 734 nm using spectrophotometer. The results were calculated as the percentage of free radical scavenging using Eq. (2) and as IC_{50}.

Ferric reducing ability of plasma (FRAP)

The FRAP assay was modified from Benzie and Strain (1996) and Kubola and Siriamornpun (2011). The FRAP reagent was generated by mixing 300 mM acetate buffer: iron reagent solution: $FeC_{l3}.6H_2O$: deionized water at 100:10:10:12 (v/v). The FRAP reagent 1.8 mL was warmed to 37 °C, then deionized water 180 µL and diluted Mao juice powders solution 60 µL were added. The mixture was shaken and incubated at 37°C for 4 min. The absorbance was measured at 593 nm using spectrophotometer. The measurement was compared to a standard curve of $FeSO_4$ concentrations and expressed in µM $FeSO_4{\cdot}g\ sample^{-1}$.

Nitric oxide radical scavenging activity

The Nitric oxide assay was done according to the method of Madan *et al.* (2010). Sodium nitroprusside in aqueous solution (10 mM) 1 mL, phosphate buffer saline (pH 7.4) 0.25 mL and diluted Mao juice powders solution 0.25 mL was mixed and incubated at 25°C for 2 h. Then, 0.5 mL

of the mixture was removed and sulfanilic acid reagent (0.33% in 20% glacial acetic acid) 1 mL was added in the other. The mixture was shaken and kept for 5 min for completing diazotization. After that, naphthylethylene diamine dihydrochloride (0.1%) 1 mL was added, mixed and kept for 30 min in diffused light. The absorbance was measured at 540 nm using spectrophotometer. The results were calculated as the percentage of free radical scavenging using Eq. (2) and as IC_{50}.

5. Statistical analysis

All data were reported as mean ± standard deviation and statistically analyzed the regression and variance (ANOVA) using the software SPSS version 12. Duncan's new multiple range test was used to determine the difference among means at 95% confidence level.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Determination of Mao juice powder qualities

The color of Mao juice powders with all carrier types had purple color (h^o were in a range of 331.66 - 333.78) and a_w values were below 0.2, resulting in longer shelf life as less free water were available for microorganism growth and biochemical reactions (Ferrari *et al*., 2013). Among three carrier types, Mao juice powder with maltodextrin had lowest moisture content and solubility time values, because maltodextrin has better reconstitution properties and dispersibility (Cai and Corke, 2000). Mao juice powders had irregular structures with different sizes and the pore suffused in the powder (Fig. 1), because crystal structures were generated during freeze drying process (Franceschinis *et al*., 2014). Gurak *et al*. (2013) studied the structure of freeze-dried grape juice powders which encapsulated by gum arabic and maltodextrin, their results supported that the powder had deformed structure.

Table 1 The qualities of Mao juice powder with different carrier types

Quality values	Maltodextrin	Gum arabic	Maltodextrin:gum arabic (1:1)
L^{*ns}	43.35 ± 1.50	42.18 ± 2.90	41.44 ± 2.23
C^{*ns}	18.04 ± 0.70	17.37 ± 0.51	17.33 ± 0.16
$h^{o\,ns}$	332.56 ± 2.26	331.66 ± 1.05	333.78 ± 0.01
a_w^{ns}	0.149 ± 0.04	0.171 ± 0.05	0.148 ± 0.00
Moisture content (%)	3.53 ± 0.62^b	5.41 ± 0.46^a	4.20 ± 0.02^b
Solubility time (s)	131.78 ± 2.34^c	631.27 ± 27.74^a	431.33 ± 36.33^b

$^{a-c}$ mean within the same row followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

^{ns} means within the same row were non significantly different ($p \leq 0.05$).

2. Determination of total anthocyanin content

TAC of powders with different carrier types was in a range of 2.31 – 2.63 mg·g fw which not significantly different ($p \leq 0.05$). According to Tonon *et al*. (2008), TAC of açai juice powders with maltodextrins and gum arabic did not significantly different. HPLC determination indicated that the major anthocyanin in Mao juice powders was delphinidin, followed by cyanidin-3-o-glucoside, and pelargonidin. However, malvidin were not found in Mao juice powder (Table 2). Delphinidin amount

of Mao juice powder with different carrier types was not significantly different ($p > 0.05$), but cyanidin-3-o-glucoside content of Mao juice powders with maltodextrin and maltodextrin:gum arabic (1:1) were higher ($p \leq 0.05$) than those with gum arabic.

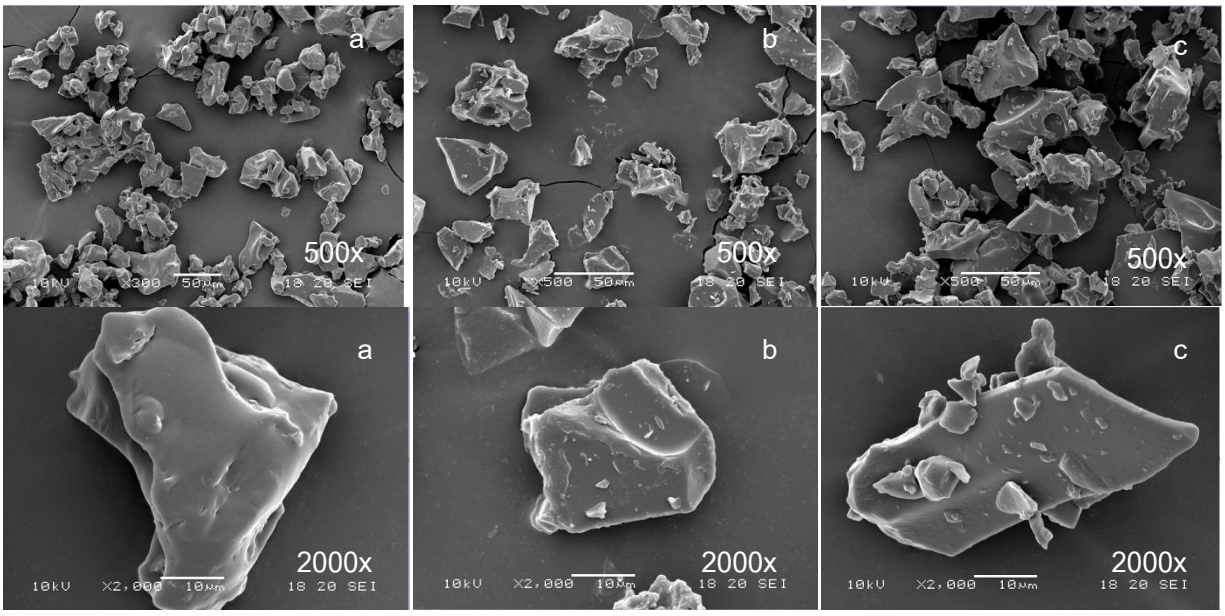


Figure 1 Scanning electron micrographs of the surface of Mao juice powders with maltodextrin (a), gum arabic (b) and maltodextrin:gum (c) at 500x and 2000x magnification.

Table 2 Total anthocyanin content and classification of individual anthocyanins by HPLC of Mao juice powder with different carrier types.

Carrier type	TAC^{ns} (mg·g fw)	Individual anthocyanin by HPLC			
		Cyanidin-3-o-glucoside (mg·g fw)	Delphinidin^{ns} (mg·g fw)	Pelargonidin (mg·g fw)	Malvidin (mg·g fw)
Maltodextrin	2.63 ± 0.25	0.78 ± 0.05^{a}	1.10 ± 0.12	nd.	nd.
Gum arabic	2.34 ± 0.22	0.62 ± 0.02^{b}	1.05 ± 0.14	nd.	nd.
Maltodextrin:gum arabic	2.31 ± 0.06	0.73 ± 0.02^{a}	1.16 ± 0.08	nd.	nd.

$^{a-b}$ mean within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

^{ns} means within the same column were non significantly different ($p \leq 0.05$).

nd. means not detected.

3. Determination of antioxidant activity

Antioxidant activities of Mao juice powders with different carrier types were investigated using DPPH, ABTS, FRAP and Nitric oxide assays and compared to a commercial antioxidant (BHT) and natural antioxidants (vitamin E and vitamin C). The results showed that among all treatments, Mao juice powders had the least antioxidant capacity (highest IC_{50} value and lowest FRAP values, which indicated that they have the least efficiency in reducing electrons). Considering among the three Mao juice powders with different carrier types, they have fairly similar antioxidant activity in FRAP assay ($p > 0.05$); but according to ABTS assay, the one with maltodextrin seemed to be a better antioxidant (p

≤ 0.05). However, Mao juice powders with maltodextrin and gum arabic had higher antioxidant capacity than those with maltodextrin:gum arabic (1:1) in DPPH assay.

Table 3 Antioxidant activities of Mao juice powder with different carrier types compared to BHT, vitamin E and vitamin C

Carrier types, commercial and natural antioxidants	DPPH IC_{50}(mg·mL^{-1})	ABTS IC_{50} (mg·mL^{-1})	FRAP (mM $FeSO_4$ g^{-1} fw)	Nitric oxide IC_{50} (mg·mL^{-1})
Maltodextrin	17.71 ± 0.71^{bc}	20.31 ± 1.45^{b}	117.65 ± 3.04^{d}	4.17 ± 0.40^{bc}
Gum arabic	17.48 ± 1.02^{b}	25.15 ± 1.87^{c}	119.32 ± 7.64^{d}	3.71 ± 0.35^{b}
Maltodextrin:gum arabic	18.45 ± 0.08^{c}	24.89 ± 0.89^{c}	114.93 ± 2.61^{d}	4.57 ± 0.09^{c}
BHT	0.33 ± 0.00^{a}	0.53 ± 0.03^{a}	1,251.60 ± 110.67^{c}	-
Vitamin E	0.40 ± 0.00^{a}	0.50 ± 0.02^{a}	3,105.79 ± 133.16^{b}	-
Vitamin C	0.15 ± 0.00^{a}	0.22 ± 0.01^{a}	12,296.85 ± 165.70^{a}	0.47 ± 0.03^{a}

$^{a-d}$ mean within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

CONCLUSION

Mao juice powders with maltodextrin, gum arabic and a combination of maltodextrin and gum arabic had slightly different in TAC and antioxidant capacities. However, the one with maltodextrin had a better potential to be used in the Mao juice powder production since it tends to have longer shelf life, lower solubility time, and lower price.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University for tools and facilities support.

REFFERENCE

Benzie, I.F. and J.J. Strain. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of ‘‘antioxidant power’’: The FRAP assay. **Analytical Biochemistry**. 239: 70–76.

Butkhup, L. and S. Samappito. 2008. An analysis on flavonoids contents in mao luang fruits of fifteen cultivars (*Antidesma Bunius*), grown in northeast Thailand. **Pakistan Journal of Biological Sciences**. 11(7): 996-1002.

Cai, Y.Z. and H. Corke. 2000. Production and properties of spray-dried *Amaranthus* betacyanin pigments. **Journal of Food Science**. 65(6): 1248-1252.

Cano-Chauca, M., P.C. Stringheta, A.M. Ramos and J. Cal-Vidal. 2005. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 6(4): 420-428.

Ferrari C.C., S.P.M. Germer, I.D. Alvim and J.M.d. Aguirre. 2013. Storage stability of spray-dried blackberry powder produced with maltodextrin or gum arabic. **Drying Technology: An International Journal**. 31(4): 470–478.

Floegel, A., D. Kim, S. Chung, S.I. Koo and O.K. Chun. 2011. Comparison of ABTS/DPPH assays to

measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. **Journal of Food Composition and Analysis**. 24: 1043-1048.

Franceschinis, L., D.M. Salvatori, N. Sosa and C. Schebor. 2014. Physical and functional properties of blackberry freeze- and spray-dried powders. **Drying Technology: An International Journal**. 32(2): 197-207.

Goula A.M., K.G. Adamopoulos and N.A. Kazakis. 2004. Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. **Drying Technology: An International Journal**. 22(5): 1129-1151

Gurak, P.D., L.M.C. Cabral and M.H. Rocha-Leão. 2013. Production of grape juice powder obtained by freeze-drying after concentration by reverse osmosis. **Brazilian Archives of Biology and Thechnology**. 56(6): 1011-1017.

Kubola, J. and S. Siriamornpun. 2011. Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). **Food Chemistry**. 127: 1138-1145.

Langrish, T.A.G., W.C. Chan and K. Kota. 2007. Comparison of maltodextrin and skim milk wall deposition rates in a pilot-scale spray dryer. **Powder Technology**. 179: 84-89.

Madan, S., G.N. Singh, Y. Kumar and K. Kohli. 2010. Phytochemical analysis and free-radical scavenging activity of *Flemingia strobilifera* (Linn) R. Br. **Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences**. 1(4): 183-190.

Martinelli, L., A.L. Gabas and J. Telis-Romero. 2007. Thermodynamic and quality properties of lemon juice powder as affected by maltodextrin and arabic gum. **Drying Technology: An International Journal**. 25(12): 2035-2045.

Motohashi, N. and H. Sakagami. 2008. Functionality of anthocyanins as alternative medicine. **Top Heterocycl Chem**. 15: 1–48.

Musika, J. and A. Sae-eaw. 2013. Effect of colors and varieties of mao fruits on physicochemical and functional properties. pp. 392-400. *In* **Proceeding of Graduate Research Conference Khon Kaen University 2013**. Khon Kaen.

Re, R., N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang and C. Rice-Evans. 1999. Antioxidant activity applying animproved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology & Medicine**. 26: 1231-1237.

Salazar-González, C.S., F.T. Vergara-Balderas, A.E. Ortega-Regules and J.A. Guerrero-Beltrán. 2012. Antioxidant properties and color of Hibiscus sabdariffa extracts. **Ciencia e Investigación Agraria**. 39 (1): 79-90.

Samappito, S. and L. Butkhup. 2008. An analysis on flavonoids, phenolics and organic acids contents in brewed red wines of both non-skin contact and skin contact fermentation techniques of mao luang ripe fruits (*Antidesma bunius*) harvested from Phupan valley in northeast Thailand. **Pakistan Journal of Biological Sciences**. 11(13): 1654-1661.

Tonon R.V., C. Brabet and M.D. Hubinger. 2008. Influence of process conditions on the physicochemical properties of Açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. **Journal of Food Engineering**. 88: 411-418.

Worsltad R.E., R.W. Durst and J. Lee. 2005. Tracking color and pigment changes in anthocyanin products. **Trends in Food Science & Technology**. 16: 423-428.

การศึกษาพฤติกรรม วิถีชีวิต และปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้ออาหารฮาลาล ประเภทขนมขบเคี้ยวของผู้บริโภคในประเทศอินโดนีเซีย

The Study of Consumption Behavior, Lifestyle and Factors Affecting Decision to Purchase Halal Snack Food in Indonesia

ณภัทร วุฒิเกรียงไกรกุล[1*] และ อัจฉรา เกษสุรรณ[1]

Napat Wuttigianggaikul[1*] and Ajchara Kessuvan[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสำรวจกลุ่มผู้บริโภคอาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยวในเมืองจาการ์ตา และเมืองสุราบายา ประเทศอินโดนีเซีย โดยศึกษาด้านประชากรศาสตร์ วิถีชีวิต และพฤติกรรมการบริโภค พบว่าลักษณะทางประชากรศาสตร์และพฤติกรรมการบริโภคของกลุ่มผู้บริโภคส่วนใหญ่ในเมืองจาการ์ตา และเมืองสุราบายามีความคล้ายคลึงกัน และเมื่อจัดกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายด้วยเทคนิค Two-step cluster analysis สามารถจัดกลุ่มผู้บริโภคทั้ง 2 เมือง ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มผู้บริโภคอายุน้อย มีรายได้ต่ำ และกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นผู้ใหญ่ มีรายได้ปานกลางถึงสูง กลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายทั้ง 2 กลุ่ม คือผลิตภัณฑ์ควรเป็นขนมขบเคี้ยวที่ทำจากธัญพืช ผลไม้ หรือถั่วอบกรอบที่มีรสชาติหลากหลายและแตกต่างจากรสที่จำหน่ายในท้องตลาด ช่องทางการจำหน่ายหลักคือร้านสะดวกซื้อ และซูเปอร์มาเก็ต อย่างไรก็ตาม กลุ่มผู้บริโภคอายุน้อยมีข้อจำกัดด้านกำลังซื้อ จึงอาจปรับบรรจุภัณฑ์ให้มีขนาดเล็ก เพื่อขายในราคาที่เหมาะสม สำหรับการส่งเสริมการตลาดควรมีการให้ทดลองชิมสินค้า และการโฆษณาทางโทรทัศน์ หรือ ณ จุดขายเพื่อสื่อสารคุณประโยชน์ของสินค้าต่อผู้บริโภคประกอบกับการส่งเสริมการขายเช่น การลดราคา เป็นต้น

ABSTRACT

This research investigated consumption behavior, lifestyle and factors affecting purchasing decision of Indonesian consumers living in Jakarta and Surabaya, Demographics and consumption behavior of consumers in Jakarta and Surabaya are similar. Target consumers are segmented by using two-step cluster analysis. They are classified into young and low income group as well as adult and middle to high income group. Marketing strategy for both targets are variety and different favors of snack product made from cereal, fruit and bean. Convenience store and supermarket are preferable channels. However, the small-sized packaging with lower price should be proper for young and low income group. Trial product, price reduction and advertisement are suitable promotion for consumer.

Key Words: snack food, Halal food, consumption behavior, Indonesia, two step cluster analysis

* Corresponding author; e-mail address: **Napat_taiki@hotmail.com**

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันตลาดอาหารฮาลาลเป็นตลาดเฉพาะที่มีศักยภาพในการขยายตัวสูง โดยในปี 2558 ประชากรมุสลิมทั่วโลกมีจำนวนประมาณร้อยละ 23.20 ของประชากรโลก (Spire research and consulting, 2015) ซึ่งประเทศไทยมีส่วนแบ่งการตลาดสินค้าอาหารฮาลาลร้อยละ 4.37 เป็นลำดับที่ 6 ของโลก มูลค่าการส่งออกคิดเป็นร้อยละ 21 ของมูลค่าการส่งออกสินค้าอาหารของไทย โดยมีมูลค่าการส่งออกไปประเทศอินโดนีเซียมากที่สุด (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2557)

ประเทศอินโดนีเซียมีประชากรมากถึง 252 ล้านคน และมีอัตราเพิ่มของประชากรร้อยละ1.08 ต่อปี (Countrymeters, 2015) นับเป็นอันดับ 4 ของโลก รองจาก จีน อินเดีย และสหรัฐอเมริกา หรือร้อยละ 3.49 ของประชากรโลก (Worldometers, 2014) อินโดนีเซียเป็นประเทศที่มีประชากรมุสลิมมากที่สุดในโลก ราว 205 ล้านคน หรือร้อยละ 88 ของประชากรทั้งหมด คิดเป็นประมาณร้อยละ 13 ของประชากรมุสลิมทั่วโลก (PewResearchCenter, 2015) เศรษฐกิจอินโดนีเซียขยายตัวอย่างต่อเนื่องเฉลี่ยร้อยละ 5.9 ต่อปี ในช่วงปี 2549–2557 และมีแนวโน้มขยายตัวต่อเนื่องร้อยละ 6.2 ต่อปี ในช่วงปี 2557-2561 เนื่องจากเศรษฐกิจที่ขยายตัวอย่างต่อเนื่องทำให้ชาวอินโดนีเซียมีกำลังซื้อสูงขึ้น ซึ่งจากจำนวนประชากรทั้งหมดของชาวอินโดนีเซีย ประชากรราว 160 ล้านคนหรือร้อยละ 67 เป็นประชากรวัยทำงานมีอายุระหว่าง 15-64 ปี ที่มีกำลังซื้อ และมีประชากรเยาวชนในช่วงอายุ 15-24 ปี มากกว่า 40 ล้านคน (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2557)

ประชากรอินโดนีเซียที่อยู่ในวัยทำงานมีบทบาทในการกำหนดทิศทางตลาด และเป็นแรงผลักดันให้เกิดความต้องการบริโภคสินค้าหลายประเภทเพิ่มมากขึ้น โดยหนึ่งในนั้นคือขนมขบเคี้ยว (Snack food) ซึ่งลักษณะของการบริโภคขนมขบเคี้ยวของคนอินโดนีเซีย มักเพิ่มขึ้นตามสถานะทางเศรษฐกิจที่มีรายได้เพิ่มขึ้น และกลุ่มผู้บริโภคโดยทั่วไปเป็นเด็ก วัยรุ่นและวัยทำงาน ดังนั้นอินโดนีเซียจึงเป็นตลาดสินค้าขนมขบเคี้ยวที่มีศักยภาพมากในปี 2557 สำนักงานส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ ณ กรุงจาการ์ตา ประมาณการว่า อินโดนีเซียจึงมีความต้องการนำเข้าสินค้าประเภทขนมขบเคี้ยวในอัตราที่สูงมากถึงประมาณร้อยละ 20-25 ต่อปี จึงเป็นตลาดที่มีโอกาสสำหรับการส่งออกจากงานวิจัยของ Waijittragum (2016) ที่วิเคราะห์พฤติกรรม ทัศนคติ เหตุผลในการซื้อและสิ่งกระตุ้นในการซื้อของผู้บริโภคชาวอินโดนีเซียที่ศึกษาในประเทศไทยจำนวน 323 คน ในผลิตภัณฑ์ 3 ประเภท คือ บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป เครื่องดื่มและขนมขบเคี้ยว และเครื่องปรุงรส พบว่าเหตุผลสำคัญในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ฮาลาลทั้ง 3 ประเภทนี้ ได้แก่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ เกี่ยวกับความสด สะอาด สารอาหารที่ได้รับ รวมไปถึงราคาที่เหมาะสมกับคุณภาพ และบรรจุภัณฑ์ที่ดึงดูด ต้องมีตราฮาลาลของอินโดนีเซียที่ชัดเจนเพื่อสร้างความเชื่อมั่นในผลิตภัณฑ์ จะเป็นสิ่งกระตุ้นให้ผู้บริโภคซื้อและกลับมาซื้อผลิตภัณฑ์นั้นซ้ำอีก

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรม วิถีการดำเนินชีวิต ตลอดจนปัจจัยทางการตลาดที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกซื้ออาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยวของผู้บริโภคเมืองจาการ์ตา เมืองสุราบายา ประเทศอินโดนีเซีย เพื่อนำมากำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับการส่งออกผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไปยังกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายในประเทศอินโดนีเซีย

อุปกรณ์และวิธีการ

ดำเนินการสัมภาษณ์กลุ่ม (Focus group interview) เพื่อรวบรวมข้อมูลด้าน พฤติกรรม วิถีชีวิต กับผู้บริโภคชาวอินโดนีเซียในประเทศไทย เพื่อเป็นแนวทางในการจัดทำแบบสอบถามให้มีความสมบูรณ์ จากนั้นจึงพัฒนาแบบสอบถามเป็นภาษาอินโดนีเซีย (Bahasa Indonesia) โดยแบบสอบถามแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่

1) ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์
2) พฤติกรรมการบริโภคและการซื้ออาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยว
3) วิถีการดำเนินชีวิต
4) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้ออาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยว

วิธีการเก็บข้อมูล

ดำเนินการทดสอบแบบสอบถาม (Pre-test) กับผู้บริโภคเป้าหมายจำนวน 30 คน จากนั้นเก็บข้อมูลโดยใช้การสัมภาษณ์แบบตัวต่อตัว (Face to Face Interview) กับกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย โดยใช้การสุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling) คือผู้บริโภคที่ศึกษาในระดับมัธยมปลายขึ้นไป อาศัยในเมืองจาการ์ตาและเมืองสุราบายา ประเทศอินโดนีเซีย และเคยรับประทานขนมขบเคี้ยว โดยจำนวนผู้ตอบแบบสอบถามในเมืองจาการ์ตา เก็บข้อมูลจากงานแสดงสินค้าอาหาร ศูนย์การแสดงสินค้า JKT expo จำนวน 366 คน และเมืองสุราบายา เก็บข้อมูลจากห้างสรรพสินค้าสุราบายาทาวน์สแควร์ จำนวน 423 คน และทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม PASW version 18

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์ และพฤติกรรมการเลือกซื้อและบริโภคขนมขบเคี้ยว

ใช้การวิเคราะห์พรรณนาสถิติในรูปของความถี่ และร้อยละ โดยวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปด้านประชากรศาสตร์ได้แก่ เพศ อายุ การศึกษา และระดับรายได้ และพฤติกรรมในการเลือกซื้อและบริโภคฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยว

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านวิถีการดำเนินชีวิต และการจัดกลุ่มผู้บริโภค

ใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis) เป็นเทคนิคที่จะจับกลุ่มหรือรวมตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ไว้ในกลุ่มหรือ Factor เดียวกัน ตัวแปรที่อยู่ใน Factor เดียวกันจะมีความสัมพันธ์กันมาก โดยความสัมพันธ์นั้นอาจจะเป็นในทิศทางบวก (ไปในทางเดียวกัน) หรือทิศทางลบ (ไปในทางตรงกันข้าม) ก็ได้ โดยใช้เทคนิคนี้เพื่อลดจำนวนตัวแปรวิถีการดำเนินชีวิต และใช้ปัจจัยด้านวิถีการดำเนินชีวิต ร่วมกับข้อมูลด้านประชากรศาสตร์เพื่อดำเนินการจำแนกกลุ่มผู้บริโภค ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ Two-step cluster analysis มีวัตถุประสงค์ เพื่อจัดกลุ่มตัวอย่างหรือจัดกลุ่มตัวแปร เพื่อลดจำนวนตัวอย่างหรือจัดกลุ่มตัวอย่างให้เป็นหมวดหมู่ การจัดกลุ่มจะใช้หลักการความเหมือนกัน หรือความใกล้เคียงกันมากที่สุดจะอยู่กลุ่มเดียวกัน

การกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับผู้บริโภคเป้าหมาย

นำผลการวิเคราะห์ทางสถิติมากำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมายในการส่งออกขนมขบเคี้ยวประเภทฮาลาลที่ผลิตจากประเทศไทย ไปยังประเทศอินโดนีเซีย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์ และพฤติกรรมการเลือกซื้อและบริโภคอาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยว

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของผู้ตอบแบบสอบถามเมืองจาการ์ตา และสุราบายา ประเทศอินโดนีเซีย พบว่าลักษณะทางประชากรศาสตร์ของกลุ่มผู้บริโภคส่วนใหญ่ในเมืองจาการ์ตา และเมืองสุราบายามีความคล้ายคลึงกัน โดยในเมืองจาการ์ตา ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงร้อยละ 54 อายุระหว่าง 23-40 ปี (อายุเฉลี่ย 33 ปี) อยู่ในวัยจบการศึกษา และวัยเริ่มต้นทำงาน ส่วนใหญ่โสดร้อยละ 50 นับถือศาสนาอิสลาม มีสมาชิกในครอบครัวเฉลี่ย 4-5 คน ผลการสำรวจระดับการศึกษา พบว่าผู้บริโภคจบการศึกษาระดับปริญญาตรีร้อยละ 60 กำลังศึกษาอยู่ร้อยละ 28 และประกอบอาชีพพนักงานบริษัทร้อยละ 26 และผู้บริโภคส่วนใหญ่ร้อยละ 67 พักอยู่บริเวณย่านที่พักอาศัย สำหรับเมืองสุราบายา ผู้บริโภคส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงร้อยละ 60 อายุระหว่าง 23-40 ปี (อายุเฉลี่ย 28 ปี) อยู่ในวัยจบการศึกษา และวัยเริ่มต้นทำงาน ส่วนใหญ่โสดร้อยละ 52 นับถือศาสนาอิสลาม มีสมาชิกในครอบครัวเฉลี่ย 4-5 คน ผลการสำรวจระดับการศึกษา พบว่าผู้บริโภคจบการศึกษาระดับปริญญาตรี ร้อยละ 52 กำลังศึกษาอยู่ร้อยละ 28 ประกอบอาชีพพนักงานบริษัทร้อยละ 29 และผู้บริโภคส่วนใหญ่ร้อยละ 60 มีที่พักอยู่บริเวณย่านที่พักอาศัย ส่วนอีกร้อยละ 40 จะอยู่ในย่านธุรกิจ และชนบท

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเลือกซื้อและบริโภคอาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยวของผู้บริโภคในเมืองจาการ์ตา และสุราบายา พบว่าผู้บริโภคในเมืองจาการ์ตาเคยบริโภคอาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยวจากประเทศไทย มาเลเซีย และญี่ปุ่นมากที่สุด ตามลำดับ และผู้บริโภคในเมืองสุราบายาเคยบริโภคอาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยวจากประเทศมาเลเซีย ไทย และญี่ปุ่นมากที่สุด ตามลำดับ ด้านพฤติกรรมการบริโภคอาหารประเภทขนมขบเคี้ยวของเมืองจาการ์ตา และเมืองสุราบายา มีความใกล้เคียงกันคือ รับประทานเป็นของว่าง ซื้อในปริมาณ 1-2 ชิ้น ทุก ๆ สัปดาห์ โดยค่าใช้จ่ายในการซื้อขนมขบเคี้ยวต่อครั้งเฉลี่ย 11,000-12,000 รูเปียห์ (หรือประมาณ 29-32 บาท) นิยมซื้อจากร้านสะดวกซื้อ ซุปเปอร์มาเก็ต และไฮเปอร์มาเก็ต ซึ่งประเภทของขนมขบเคี้ยวที่กลุ่มผู้บริโภคชื่นชอบ คือ ผลไม้ สาหร่ายทะเล และผักต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับวิถีชีวิตของกลุ่มผู้บริโภคในเมืองจาการ์ตา และเมืองสุราบายาที่มีลักษณะเป็นผู้ที่ใส่ใจสุขภาพ ให้ความสำคัญกับตราฮาลาล คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และฉลากบนผลิตภัณฑ์ โดยเหตุผลในการซื้ออาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยว คือ รสชาติที่อร่อย คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดี และราคาที่เหมาะสม (Table 1) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pibool (2016) ที่ทำการศึกษาพฤติกรรม ทัศนคติ เหตุผลในการซื้อ และสิ่งกระตุ้นในการซื้อของผู้บริโภคชาวอินโดนีเซียที่ศึกษาในประเทศไทย โดยศึกษาจากผลิตภัณฑ์ 3 ประเภท คือ บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป เครื่องดื่มและขนมขบเคี้ยว พบว่าผู้บริโภคมีความเชื่อมั่นในผลิตภัณฑ์ฮาลาลของประเทศอินโดนีเซีย ส่วนเหตุผลสำคัญในการเลือกซื้อนั้น จะดูจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ ความสด สะอาด สารอาหารที่ได้รับ รวมไปถึงราคาที่เหมาะสมกับคุณภาพ และการทำบรรจุภัณฑ์ให้ดึงดูด คือ ควรทำตัวอักษรให้ดูทันสมัย อ่านง่าย ต้องมีตราฮาลาลที่ชัดเจน จะเป็นสิ่งกระตุ้นให้ผู้บริโภคซื้อและกลับมาซื้อผลิตภัณฑ์นั้นอีกครั้ง

Table 1 Consumption Behavior of Halal Snack Food

Consumption Behavior		Percentage (%)	
		Jakarta	Surabaya
Frequency	Every week	58.8	41.0
	At least once a month	23.7	27.9
	Once in several months	17.5	31.2
Quantity	1 - 2 pieces per time	64.2	63.8
	3 - 5 pieces per time	27.5	30.9
	>5pieces per time	8.2	5.3
Average buying price	(IDR.)	11,115.35	12,002.49
Reason to purchase	Taste	31.6	40.9
	Brand	8.1	5.5
	Convenience to buy	9.7	8.0
	Quality	12.4	11.8
	Country of Origin	7.2	6.1
	Price	9.9	10.6
	New product	4.9	2.9
	Substitution	5.9	4.5
	Packaging	4.9	3.7
	Flavor	5.3	5.8
Time to consume	Breakfast	22.7	16.4
	Lunch	9.3	18.9
	Dinner	1.5	7.6
	Night	2.6	8.3
	Supper	64.0	48.9
Buying place	Convenience Store	31.2	47.4
	Supermarket	32.4	22.9
	Hypermarket	19.6	19.7
	Local grocery store	4.8	4.6

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านวิถีการดำเนินชีวิตและการจัดกลุ่มผู้บริโภค

ข้อมูลด้านวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคในเมืองจาการ์ตา และสุราบายามีคำถามทั้งหมด 13 ข้อ ได้นำมาลดจำนวนตัวแปร โดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis) ได้ผลคือ เมืองจาการ์ตา วิถีการดำเนินชีวิต มีจำนวน 4 ปัจจัยได้แก่ 1.ใส่ใจสุขภาพ 2.เปิดรับสิ่งใหม่ 3.ชอบเข้าสังคม และ 4.ตระหนักถึง

ตราฮาลาลและคุณภาพสินค้า เมืองสุราบายา วิถีการดำเนินชีวิต มีจำนวน 2 ปัจจัยได้แก่ 1.ตระหนักถึงสุขภาพตราฮาลาลและ 2.คุณภาพสินค้า ชอบเข้าสังคมและเปิดรับสิ่งใหม่

จากนั้นจัดกลุ่มผู้บริโภคด้วยเทคนิค Two-step cluster analysis โดยใช้ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์และด้านวิถีชีวิต สามารถจัดกลุ่มผู้บริโภคชาวจาการ์ตาและสุราบายาได้เป็น 2 กลุ่ม โดยผู้บริโภคกลุ่มที่ 1 ในเมืองจาการ์ตา ส่วนใหญ่จะมีสถานภาพโสด ศึกษาอยู่ระดับปริญญาตรี เป็นนิสิต นักศึกษา นับถือศาสนาอิสลาม มีรายได้ต่ำ เป็นพวกที่เปิดใจรับสิ่งใหม่ ๆ และชอบเข้าสังคม ในขณะที่ผู้บริโภคกลุ่มที่ 2 ส่วนใหญ่จะแต่งงานแล้วและเป็นวัยทำงาน จบการศึกษาในระดับปริญญาตรี นับถือศาสนาอิสลาม มีรายได้ปานกลางถึงสูง เป็นพวกที่เปิดใจรับสิ่งใหม่ ๆ และชอบเข้าสังคม ส่วนผู้บริโภคในเมืองสุราบายานั้นกลุ่มที่ 1 ส่วนใหญ่จะมีสถานภาพโสด ศึกษาอยู่ระดับมัธยมศึกษา เป็นนักเรียน นักศึกษา นับถือศาสนาอิสลาม มีรายได้ต่ำ เป็นพวกที่เปิดใจรับสิ่งใหม่ ๆ ชอบเข้าสังคม และใส่ใจในเรื่องของสุขภาพด้วย ส่วนกลุ่มที่ 2 ส่วนใหญ่จะแต่งงาน และเป็นวัยทำงาน จบการศึกษาในระดับปริญญาตรี นับถือศาสนาอิสลาม มีรายได้ปานกลางถึงสูง เป็นพวกใส่ใจสุขภาพและสนใจในเรื่องคุณภาพของสินค้า ดังนั้นจะเห็นว่าผู้บริโภคกลุ่มที่ 1 ของทั้งสองเมือง มีลักษณะคล้ายกันคือ เป็นกลุ่มผู้บริโภคที่อายุน้อย และมีรายได้ต่ำ ส่วนผู้บริโภคในกลุ่มที่ 2 มีลักษณะคล้ายกันคือ เป็นกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นผู้ใหญ่ และมีรายได้ปานกลางถึงสูง (Table 2)

การกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย

กลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายกลุ่มที่ 1 ทั้งในเมืองจาการ์ตาและเมืองสุราบายาสามารถจัดได้เป็นกลุ่มคนอายุน้อย และรายได้ต่ำ โดยมีลักษณะทางประชากรศาสตร์และวิถีชีวิตคล้ายกันคือ เป็นผู้ที่เปิดรับสิ่งใหม่ ชอบเข้าสังคม โดยดูจากค่า factor score ที่มีค่าตัวเลขสูง (Table 2) และส่วนมากยังคงศึกษาอยู่ในชั้นมัธยม และปริญญาตรี ทำให้มีข้อจำกัดในด้านกำลังซื้อ แต่อย่างไรก็ตามกลุ่มผู้บริโภคกลุ่มนี้เป็นกลุ่มคนที่มีการศึกษาจึงมีความต้องการสินค้าที่ดีและมีคุณภาพ และนิยมความสะดวก ดังนั้นผลิตภัณฑ์กลุ่มขนมขบเคี้ยว สำหรับกลุ่มนี้จะต้องตอบสนองต่อความต้องการและสอดคล้องกับกำลังซื้อ คือมีลักษณะเป็นสินค้ามวลชน (Mass product) ที่มีคุณภาพและความปลอดภัยเช่น ขนมขบเคี้ยวที่ทำจากธัญพืช ผลไม้ หรือถั่วอบกรอบที่มีรสชาติหลากหลายและแตกต่างจากรสที่จำหน่ายในตลาดบรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ง่ายต่อการใช้เช่น ซิปล๊อคขนาดบรรจุภัณฑ์ควรเป็นขนาดเล็ก เพื่อให้ราคาไม่สูงมากนัก เนื่องจากผู้บริโภคมีความไวต่อราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นการตั้งราคาต้องสอดคล้องกับคุณภาพที่ผู้บริโภครับรู้สำหรับช่องทางการจัดจำหน่าย ควรเป็นร้านสะดวกซื้อ ที่อยู่ใกล้ที่พักอาศัย มหาวิทยาลัย หรือโรงเรียน ด้านการส่งเสริมการตลาดนั้น ควรมีการให้ทดลองชิมสินค้า มีพนักงานแนะนำสินค้า การลดราคาสินค้า และการโฆษณาทางโทรทัศน์หรือ ณ จุดขาย โดยการโฆษณาอาจใช้พรีเซนเตอร์ที่เป็นดาราหรือนักแสดงของประเทศไทย ซึ่งได้รับความนิยมในประเทศอินโดนีเซีย

Table 2 Demographics and lifestyle of consumer in Jakarta and Surabaya

Demographics and Lifestyle	Jakarta		Surabaya	
	Cluster 1 Young and low income (n=122)	Cluster 2 Adult and middle to high income (n=187)	Cluster 1 Young and low income (n=134)	Cluster 2 Adult and middle to high income (n=236)
Gender	Female (58.2%)	Female (52.4%)	Female (71.6%)	Female (54.2%)
Status	Single (99.2%)	Married (83.4%)	Single (95.5%)	Married (75.0%)
Education	Bachelor Degree (68%)	Bachelor Degree (57.8%)	High school (53.7%)	Bachelor Degree (58.9%)
Religion	Islam (78.7%)	Islam (67.4%)	Islam (87.3%)	Islam (74.2%)
Occupation	Student (69.7%)	Working (71.1%)	Student (73.9%)	Working (77.9%)
Revenue	< 1.5 M IDR. (47.5%)	3 - 7 M IDR. (36.4%)	< 1.5 M IDR. (56.7%)	3 - 7 M IDR. (39.8%)
Home location	Residential area (68.9%)	Residential area (65.2%)	Residential area (59.0%)	Residential area (63.1%)
Lifestyle				
	Factor score	Factor score	Factor score	Factor score
Health concerned	-0.06	0.04		
Open-minded	-0.16	0.09		
Socialized	0.15	-0.07		
Halal and quality-concerned	0.06	-0.02		
Health, halal and quality concerned			0.05	0.06
Socialized and open-minded			-0.05	0.04

กลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายกลุ่มที่ 2 ทั้งในเมืองจาการ์ตาและเมืองสุราบายา เป็นกลุ่มที่เป็นผู้ใหญ่ และรายได้ปานกลางถึงสูงเนื่องจากกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายทั้ง 2 เมือง มีลักษณะทางประชากรศาสตร์คล้ายกันคือเป็นกลุ่มวัยทำงาน มีการศึกษาและมีกำลังซื้อที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการที่มีความซับซ้อนมากขึ้นของตนเองได้ สินค้าขนมขบเคี้ยวที่เหมาะสมควรเป็นกลุ่มสินค้าคุณภาพสูง (Selective product) อย่างไรก็ตามวิถีชีวิตของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายทั้ง 2 เมืองมีความแตกต่างกันคือชาวจาการ์ตาเป็นผู้ที่เปิดรับสิ่งใหม่ และชอบเข้าสังคม ดังนั้นผลิตภัณฑ์ควรเป็นขนมขบเคี้ยวที่ทำจากธัญพืช ผลไม้ หรือถั่วอบกรอบที่มีรสชาติหลากหลายแตกต่างและมีรูปแบบที่แปลกใหม่จากรสที่จำหน่ายในท้องตลาด แต่ยังต้องคงภาพลักษณ์สินค้าที่มีคุณภาพดี เนื่องจากเป็นสินค้านำเข้าที่โดยปกติแล้วราคาจะสูงกว่าสินค้าที่จำหน่ายตามช่องทางทั่วไปเพื่อให้ผลิตภัณฑ์

สามารถแข่งขันกับสินค้าในประเทศที่ราคาต่ำกว่า ส่วนกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายในเมืองสุราบายาเป็นผู้ที่ใส่ใจสุขภาพ ตระหนักในเรื่องตราฮาลาล และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ควรเป็นขนมขบเคี้ยวที่ทำจากธัญพืช ผลไม้ หรือถั่ว ที่ปราศจากผงชูรสหรือสารปรุงแต่ง และเป็น Healthy product เช่น ไขมันต่ำ น้ำตาลน้อย หรือมีกระบวนการผลิตที่ไม่ใช้น้ำมัน การตั้งราคาควรมีความเหมาะสมกับคุณภาพที่ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้ ส่วนช่องทางการจัดจำหน่าย ควรเป็นร้านสะดวกซื้อ หรือโมเดิร์นเทรดอื่น ๆ เช่น ซูเปอร์มาเก็ต ไฮเปอร์มาเก็ตที่อยู่ใกล้ที่พักอาศัย สำหรับการส่งเสริมการตลาด ควรมีการให้ทดลองชิมสินค้า การใช้โบรชัวร์ และการโฆษณาทางโทรทัศน์ หรือ ณ จุดขายเพื่อสื่อสารคุณประโยชน์ของสินค้าต่อผู้บริโภคประกอบกับการส่งเสริมการขายเช่นการลดราคา การให้ของแถม การขายแบบแพ็คคู่ เป็นต้น

สรุป

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการบริโภคอาหารฮาลาลประเภทขนมขบเคี้ยวของผู้บริโภคในเมืองจาการ์ตาและเมืองสุราบายา พบว่ามีความคล้ายคลึงกันคือ รับประทานเป็นของว่าง ซื้อในปริมาณ 1-2 ชิ้น ทุก ๆ สัปดาห์ โดยซื้อจากร้านสะดวกซื้อ ซุปเปอร์มาเก็ต และไฮเปอร์มาเก็ต ซึ่งประเภทของขนมขบเคี้ยวที่กลุ่มผู้บริโภคชื่นชอบคือ ผลไม้ สาหร่ายทะเล และผักต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับวิถีชีวิตของกลุ่มผู้บริโภคในเมืองจาการ์ตา และเมืองสุราบายาที่เป็นผู้ที่ใส่ใจสุขภาพ ให้ความสำคัญกับตราฮาลาล คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และฉลากบนผลิตภัณฑ์ ผลการจำแนกกลุ่มผู้บริโภคตามลักษณะทางประชากรศาสตร์และวิถีชีวิตออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มผู้บริโภคอายุน้อย รายได้ต่ำ สำหรับกลุ่มนี้จะต้องตอบสนองต่อความต้องการและสอดคล้องกับกำลังซื้อ คือมีลักษณะเป็นสินค้ามวลชน (Mass product) ที่มีคุณภาพและความปลอดภัยเช่น ขนมขบเคี้ยวที่ทำจากธัญพืช ผลไม้ หรือถั่วอบกรอบที่มีรสชาติหลากหลายและแตกต่างจากรสที่จำหน่ายในตลาดบรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ง่ายต่อการใช้เช่น ซิปล็อคขนาดบรรจุภัณฑ์ควรเป็นขนาดเล็ก เพื่อให้ราคาไม่สูงมากนัก และกลุ่มที่เป็นผู้ใหญ่ รายได้ปานกลางถึงสูง มีกำลังซื้อที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการที่มีความซับซ้อนมากขึ้นของตนเองได้ สินค้าขนมขบเคี้ยวที่เหมาะสมควรเป็นกลุ่มสินค้าคุณภาพสูง (Selective product) ส่วนช่องทางการจัดจำหน่าย ควรเป็นร้านสะดวกซื้อ หรือโมเดิร์นเทรดอื่น ๆ เช่น ซูเปอร์มาเก็ต ไฮเปอร์มาเก็ตที่อยู่ใกล้ที่พักอาศัย มหาวิทยาลัย และโรงเรียน โดยผลการวิจัยดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนากลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสมกับความต้องการของผู้บริโภคเป้าหมาย และเป็นแนวทางในการขยายตลาดส่งออกผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวไปสู่ประเทศอินโดนีเซียได้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ อัจฉรา เกษสุวรรณ ที่คอยให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้าน สำหรับงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณมูลนิธิเพื่อสถาบันอาหาร กระทรวงอุตสากรรมที่สนับสนุนทุนในการวิจัยภายใต้โครงการ “โครงการศึกษาพฤติกรรมผู้บริโภคและอุตสาหกรรมอาหารในประเทศอินโดนีเซีย”

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์. 2557. ข้อมูลอุตสาหกรรมฮาลาล. **กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ**. แหล่งที่มา: http: // www.ditp.go.th., 15 กรกฎาคม 2558

Countrymeters. 2015. Indonesian Population. **Indonesian Population**. Available Source: Http://countrymeters.info/en/Indonesia, September 2, 2015.

PewResearchCenter. 2015. Muslim Population of Indonesia. **PewResearchCenter**. Available Source: Http://www.pewforum.org/2010/11/04/muslim-population-of-indonesia/, September 2, 2015.

Pibool, W. 2016. Design Trends of Thai Halal Products Packaging for Muslim Country: Indonesian Food Products. **Journal of Economics, Business and Management**. 4 (1): 47-52.

Spire research and consulting. 2015. The Global Halal Food Market – Riding a wave of growth. **Spire Journal 2015**. Available Source: Http://www.spireresearch.com/spire-journal/yr2015/q1/the-global-halal-food-market-riding-a-wave-of-growth/, September 2, 2015.

Waijittragum, P. 2016. Design Trends of Thai Halal Products Packaging for Muslim Country: Indonesian Food Products. **Journal of Economics, Business and Management**.4 (1): 47-52.

Worldometers. 2014. Indonesian Population. **World Population**. Available Source: Http://www.worldometers.info/world-population/indonesia-population/, September 2, 2015.

การศึกษาพฤติกรรม วิถีการดำเนินชีวิต และปัจจัยทางการตลาดที่มีผลต่อการซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องของชาวอินโดนีเซีย

The Study of Consumption Behavior, Lifestyle and Marketing FactorsAffecting Decision to Purchase Halal Canned Fish of Indonesian Consumers

อารีรัตน์ เกษมวุฒิ[1*] และ อัจฉรา เกษสุวรรณ[1]

Areerat Kasemvut[1*] and Ajchara Kessuvan[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะประชากรศาสตร์ วิถีการดำเนินชีวิต พฤติกรรมการบริโภคและปัจจัยทางการตลาดที่มีผลต่อการซื้ออาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องของชาวอินโดนีเซียในเมืองจาการ์ตาและสุราบายาจากแบบสอบถาม พบว่าผู้บริโภคทั้ง 2 เมือง ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงที่มีสถานภาพโสด ช่วงอายุ 23-40 ปี เป็นนักศึกษาและพนักงานบริษัท ผู้บริโภคจาการ์ตาจะซื้อปลากระป๋องบ่อยครั้งกว่าเมื่อเทียบกับผู้บริโภคสุราบายา ซึ่งซุปเปอร์มาร์เก็ตและร้านสะดวกซื้อเป็นสถานที่ที่ผู้บริโภคชอบเลือกซื้อ ผู้บริโภคทั้ง 2 เมืองให้ความสำคัญกับสุขภาพและยินดีที่จะจ่ายเงินในราคาที่สูงขึ้นเพื่อสินค้าที่มีคุณภาพ แต่ชาวสุราบายายังคงให้ความสำคัญกับเครื่องหมายฮาลาลด้วย ดำเนินการจำแนกกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายด้วย Two-step cluster analysis ได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มผู้บริโภคที่มีอายุน้อยรายได้น้อย กับกลุ่มที่มีอายุมากรายได้สูง ทั้งสองกลุ่มมีความใส่ใจ ในสุขภาพและเปิดรับสิ่งใหม่ กลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับผู้บริโภคทั้ง 2 กลุ่มนั้น ผู้ประกอบการไทยควรมุ่งเน้น ใช้วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ ปราศจากสารปรุงแต่ง มีเครื่องหมายฮาลาลโดยจำหน่ายที่ซุปเปอร์มาร์เก็ตและร้านสะดวกซื้อ ส่วนกลุ่มผู้บริโภคอายุน้อย ควรเพิ่มกลยุทธ์ด้านบรรจุภัณฑ์ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดราคาขายแต่ยังเหมาะสมกับคุณภาพ ตลอดจนการส่งเสริมการตลาดที่ดึงดูดใจผู้บริโภคกลุ่มนี้

ABSTRACT

This research explores the demographics, lifestyles, consumption behaviors and purchasing factors of Indonesian consumers toward the canned fish product. Questionnaire survey is conducted with consumers in Jakarta and Surabaya. In general, target consumers are single females, 23-40 years old, and majority are student and employee. Jakarta consumers purchase canned fish relatively more often than Surabaya consumers. Supermarket and convenience store are favorable channels. Jakarta and Surabaya consumers are health-concerned and willing to pay for more quality; however Surabaya consumers more concern on halal label. Two-step cluster analysis is applied to segment the target consumers into young and senior groups with health-concernedand innovative. Practical marketing strategy is suggested for Thai exporters. The natural ingredients, no food additives and halal label should be developed with supermarket and convenience store for distribution. Finally, small size product and promotion should be provided to attract young consumer group.

Key Words: Halal Food, Canned Fish,Indonesian Consumer, Lifestyle, Marketing Strategy

* Corresponding author; e-mail address: **taohuyee.ak@gmail.com**

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันประชากรมุสลิมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2556 มีจำนวนประมาณ 1,676.43 ล้านคน คิดเป็นร้อยละ 23.69 ของประชากรโลกผลการศึกษาของสถาบันวิจัย พิวรีเสิร์ช เซ็นเตอร์ (Pew Research Center, 2015) คาดว่าอัตราการขยายตัวของชาวมุสลิมภายในปี 2573 จะเพิ่มเป็นร้อยละ 26.4 ของประชากรโลกทั้งหมด จากประชากรชาวมุสลิมจำนวนมหาศาลนี้ทำให้ตลาดอาหารฮาลาลกลายเป็นตลาดที่น่าสนใจสำหรับการส่งออก สำหรับในภูมิภาคเอเชียนั้นอินโดนีเซียเป็นประเทศที่มีจำนวนประชากรมากเป็นอันดับ 4 ของโลก ถึง 251.16 ล้านคน และประชากรส่วนใหญ่นับถือศาสนาอิสลามประมาณร้อยละ 86 (Global Islamic Finance Report, 2013) จึงทำให้มีความต้องการในการบริโภคอาหารฮาลาลจำนวนมาก และต้องพึ่งพิงการนำเข้าอาหารฮาลาลจากต่างประเทศเป็นสัดส่วนสูงถึงเกือบร้อยละ 90 ของการนำเข้าอาหารทั้งหมด (ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย, 2557) จึงเป็นโอกาสของผู้ผลิตอาหารฮาลาลในการส่งออกไปยังตลาดอินโดนีเซีย โดยผลิตภัณฑ์ประเภทปลากระป๋องถือว่าเป็นธุรกิจที่มีศักยภาพในการส่งออกไปยังอินโดนีเซียเนื่องจากเนื้อปลาเป็นอาหารฮาลาลที่ชาวมุสลิมสามารถบริโภคได้ตามหลักศาสนา โดยประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์ปลากระป๋อง 91,340 ล้านบาท (กรมประมง, 2557) โดยในปี 2556 มูลค่าตลาดของผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋องในอินโดนีเซียมีมูลค่าประมาณ 536.4 ล้านเหรียญสหรัฐ และเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 14 ในปี 2557 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในวิถีชีวิตชาวอินโดนีเซียในเมืองใหญ่ที่เร่งรีบมากขึ้น และอาหารกระป๋องสามารถเก็บรักษาได้ยาวนาน ใช้เวลาในการจัดเตรียมน้อย และบริโภคได้สะดวก จึงเป็นสาเหตุหลักที่ผู้บริโภคนิยมเลือกซื้ออาหารกระป๋อง (Euromonitor International, 2014)

ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมการบริโภคอาหารฮาลาลของชาวมุสลิมในอินโดนีเซียและอื่น ๆ อาทิ Ismoyowati (2015) สำรวจการบริโภคอาหารแปรรูปจากเนื้อไก่ของชาวมุสลิมในเกาะชวา พบว่าผู้บริโภคตัดสินใจซื้ออาหารเนื่องจากรสชาติของอาหารเป็นหลัก นอกจากนั้นคือการพิจารณาว่ามีเครื่องหมายฮาลาลและหลักโภชนาการ เช่นเดียวกับ Mohamed *et al.* (2008) ศึกษาเกี่ยวกับความเชื่อมั่นของผู้บริโภคชาวมุสลิมในประเทศมาเลเซีย ที่มีต่อผลิตภัณฑ์อาหารที่มีเครื่องหมายฮาลาล พบว่าเครื่องหมายฮาลาลสำคัญต่อผู้บริโภคชาวมุสลิมมาก รวมทั้งปัจจัยทางสังคมและเศรษฐกิจก็มีผลต่อพฤติกรรมการบริโภคอาหารฮาลาล Carlucci *et al* (2014) ได้ศึกษาพฤติกรรมการซื้อผลิตภัณฑ์ปลาและอาหารทะเลของนักศึกษานานาชาติพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความชอบของผู้บริโภคคือคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ รองลงมาคือความเชื่อด้านสุขภาพ นิสัยการบริโภค ความสะดวกสบายในการซื้อเป็นต้นส่วนงานของ Mohani*et al*. (2013) ได้ศึกษาธุรกิจขนาดเล็กและกลาง (SMEs) เรื่องการรับรู้ถึงการรับรองตราอาหารฮาลาลในประเทศอินโดนีเซีย พบว่าผู้ประกอบการมีความมุ่งมั่นที่บริษัทจะต้องได้รับรองเครื่องหมายฮาลาลเพื่อความน่าเชื่อถือและสามารถเพิ่มส่วนแบ่งการตลาด และเชื่อว่าอินโดนีเซียเป็นศูนย์กลางของอาหารฮาลาลของโลก

ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรม วิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคชาวอินโดนีเซีย และปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง จะสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับผู้ประกอบการไทยที่ส่งออกผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการเก็บข้อมูล

ดำเนินการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามเป็นภาษาบาฮาซาอินโดนีเซีย (Bahasa Indonesia) ซึ่งเป็นคำถามปลายปิด (Closed-ended questions) โดยใช้การสัมภาษณ์แบบตัวต่อตัว (Face to Face Interview) กับกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย โดยการใช้การสุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (Purposive sampling) คือ กลุ่มผู้บริโภคที่อาศัยอยู่ในเมืองจาการ์ตาและสุราบายาประเทศอินโดนีเซีย และเคยรับประทานผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง จำนวน 783 คน ซึ่งแบบสอบถามจะแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ลักษณะทางประชากรศาสตร์พฤติกรรมการบริโภคและการเลือกซื้อปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง (4Ps) และวิถีการดำเนินชีวิตคำถามด้านปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกซื้อและด้านวิถีการดำเนินชีวิตเป็นการให้คะแนนโดยใช้สเกล 9 ระดับ (A nine-point Likert scale) ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม PASW version 18 และทดสอบแบบสอบถาม (Pre-test) กับผู้บริโภคเป้าหมายจำนวน 30 คน

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์และด้านพฤติกรรมการบริโภคและการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องใช้การวิเคราะห์พรรณนาสถิติในรูปของความถี่ร้อยละ

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง (4Ps) ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปัจจัยทางการตลาด (4Ps) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การวิเคราะห์ข้อมูลด้านวิถีการดำเนินชีวิต ใช้การวิเคราะห์พรรณนาสถิติในรูปของค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ร่วมกับการใช้เทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor analysis) เพื่อจัดกลุ่มผู้บริโภคตามวิถีการดำเนินชีวิต

การจำแนกผู้บริโภคผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง ด้วยวิธีการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่ม (Two-step cluster analysis) เพื่อแสดงลักษณะของกลุ่มผู้บริโภคแต่ละกลุ่มด้วยข้อมูลทางประชากรศาสตร์และวิถีการดำเนินชีวิต

การกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสมกับกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายสำหรับการส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องไปยังประเทศอินโดนีเซีย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์

จากการสำรวจการตอบแบบสอบถาม จากชาวอินโดนีเซียในเมืองจาการ์ตา (JKT) และสุราบายา(SBY) เป็นจำนวน 361 และ 422 คน ตามลำดับ พบว่า ลักษณะประชากรศาสตร์ส่วนใหญ่ของผู้ตอบแบบสอบถามทั้ง 2 เมืองคล้ายคลึงกัน โดยส่วนใหญ่ของผู้ตอบแบบสอบถามเป็น เพศหญิง (JKT 54%, SBY 60%) มีช่วงอายุ 23-40 ปี (JKT 60% อายุเฉลี่ย 33 ปี, SBY 59% อายุเฉลี่ย 28 ปี) สถานภาพโสด (JKT 49%, SBY 51%) นับถือศาสนาอิสลาม (JKT 72%, SBY 79%) มีการศึกษาสูงสุดที่ระดับปริญญาตรี (JKT 61%, SBY 52%) อาชีพส่วนใหญ่คือนักศึกษา (JKT 29%, SBY 28%) และพนักงานบริษัท (JKT 25%, SBY 29%) รายได้ครอบครัวต่อเดือน 3-7 ล้านรูเปียห์อินโดนีเซีย (JKT 29%, SBY 32%) มีสมาชิกในครอบครัวเฉลี่ย 4-5 คนโดยส่วนใหญ่บริเวณที่พักอาศัยจะเป็นหมู่บ้านจัดสรร

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านพฤติกรรมการบริโภคและการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการบริโภคและการเลือกซื้อของชาวอินโดนีเซียในเมืองจาการ์ตาและสุราบายานั้นมีพฤติกรรมที่เหมือนกัน คือ เคยรับประทานผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องจากประเทศมาเลเซียมากที่สุด (JKT 29%, SBY 29%) รองลงมาคือประเทศไทย (JKT 28%, SBY 21%) ซึ่งผู้บริโภครู้จักสินค้ามาจากสื่อโทรทัศน์มากที่สุด (JKT 41%, SBY 42%) ในการซื้อสินค้าผู้บริโภคจะซื้อ 1-2 ชิ้นต่อครั้ง (JKT 72%, SBY 76%) เหตุผลในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์จะดูจากรสชาติของปลากระป๋อง (JKT 30%, SBY 35%) รองลงมาคือ การจัดเตรียมนั้นง่ายต่อการปรุงและคุณภาพของสินค้า โดยมักซื้อสินค้าเพื่อตัวเองบริโภคเป็นหลัก (JKT 65%, SBY 65%) ดังนั้นบุคคลที่มีอิทธิพลในการตัดสินใจซื้อจึงเป็นตัวผู้บริโภคเอง (JKT 86%, SBY 79%) โดยหากจะไม่ซื้อผลิตภัณฑ์ปลากระป๋องนั้นซ้ำเหตุผลหลัก คือ รสชาติไม่ดี ไม่ถูกใจ (JKT 42%, SBY 54%) ซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลในการเลือกซื้อ และผู้บริโภคทั้ง 2 เมืองนั้นชอบบรรจุภัณฑ์ปลากระป๋องแบบกระป๋อง (can) มากกว่าแบบซอง (pouch) (JKT 81%, SBY 80%)

ส่วนพฤติกรรมการบริโภคและการเลือกซื้อของชาวอินโดนีเซียในเมืองจาการ์ตาและสุราบายาที่แตกต่างกัน คือ ด้านความถี่ในการซื้อ โดยในเมืองจาการ์ตาร้อยละ 46 มักจะซื้อผลิตภัณฑ์ปลากระป๋องทุกสัปดาห์ในขณะที่สุราบายาร้อยละ 39 มักจะซื้อสินค้าหลายเดือนต่อครั้ง และผู้บริโภคในเมืองจาการ์ตาส่วนใหญ่ร้อยละ 36 จะซื้อสินค้าที่ซุปเปอร์มาร์เก็ต แต่ผู้บริโภคสุราบายาจะเลือกซื้อที่ร้านสะดวกซื้อมากกว่าที่ร้อยละ 47

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง (4Ps) ของเมืองจาการ์ตาและสุราบายา (Table 1) โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) พบว่า ผู้บริโภคทั้ง 2 เมืองให้ความสำคัญกับปัจจัยทางการตลาดทั้ง 4 ด้าน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังนั้น ผู้ประกอบการที่ผลิตอาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องควรจะให้ความสำคัญกับปัจจัยทางการตลาดทั้ง 4 ด้านไปพร้อมๆกันในการทำการตลาดอุตสาหกรรมปลากระป๋องในประเทศอินโดนีเซียหากดูคะแนนการให้ความสำคัญเฉลี่ยจะเห็นว่าคะแนนโดยรวมของเมืองจาการ์ตาจะมีคะแนนเฉลี่ยสูงกว่าเมืองสุราบายา ซึ่งคะแนนเฉลี่ยสูงสุดของปัจจัยการตลาดของทั้ง 2 เมือง คือ ปัจจัยด้านราคา (7.94 และ 7.63 คะแนนตามลำดับ) โดยปัจจัยย่อยในด้านราคาที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญคือ ราคาเหมาะสมกับคุณภาพและปริมาณ นั้นหมายถึงผู้บริโภคยินดีที่จะจ่ายเงินในราคาที่สูงขึ้นเพื่อสินค้าที่มีคุณภาพและเหมาะสมกับปริมาณ

Table 1 Marketing factors affecting decision to purchase canned foods of Indonesian consumers

Marketing Factors	Important score (Mean ± SD)	
	Jakarta	Surabaya
Product	7.78 ± 1.48a[1/]	7.52 ± 1.61a
Price	7.94 ± 1.25a	7.63 ± 1.59a
Distribution channel	7.77 ± 1.42a	7.45 ± 1.65a
Promotion	7.81 ± 1.45a	7.45 ± 1.66a

[1/] Means within a column under each factor, means followed by a same letter are not significantly difference at the 5% level.

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านวิถีการดำเนินชีวิต

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้านวิถีการดำเนินชีวิตของชาวอินโดนีเซีย (Table 2) พบว่าวิถีการดำเนินชีวิตของคนในเมืองจาการ์ตาจะให้ความสำคัญกับการหลีกเลี่ยงอาหารที่มีสารเติมแต่งมากที่สุดเช่นเดียวกับคนในเมืองสุราบายา (8.13 และ 7.67 ตามลำดับ) โดยวิถีการดำเนินชีวิตของคนในเมืองจาการ์ตาที่ให้ความสำคัญรองลงมา คือ ยินดีที่จะจ่ายกับสินค้าที่มีคุณภาพมากกว่าและมีความใส่ใจด้านสุขภาพ ในขณะที่ในเมืองสุราบายาจะมีวิถีชีวิตรองลงมา คือ ใส่ใจด้านสุขภาพและให้ความสำคัญกับเครื่องหมายฮาลาลในอาหารแปรรูปว่าเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor analysis) เพื่อลดจำนวนตัวแปร พบว่าจากคำถามวิถีการดำเนินชีวิต 13 ข้อ สามารถจัดออกเป็น 4 ปัจจัยคือ การเปิดรับสิ่งใหม่ การใส่ใจและรักสุขภาพ การชอบเข้าสังคม และการให้ความสำคัญกับคุณภาพและตราฮาลาล ในขณะที่เมืองสุราบายาสามารถจัดกลุ่มตัวแปรตามวิถีการดำเนินชีวิตออกเป็น 2 ปัจจัยคือ การให้ความสำคัญกับคุณภาพและตราฮาลาลและห่วงใยสุขภาพ กับการชอบเข้าสังคมและเปิดรับสิ่งใหม่ จากนั้นจึงนำตัวแปรวิถีการดำเนินชีวิตที่จัดกลุ่มแล้วไปดำเนินการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มผู้บริโภคต่อไป

Table 2 Lifestyle of Indonesian consumers

Lifestyle	Important score (Mean ± SD)	
	Jakarta	Surabaya
1. Avoid eating food that contain food additives	8.13 ± 1.32	7.67 ± 1.62
2. Willing to pay for more quality	8.07 ± 1.33	7.65 ± 1.56
3. Concern Health	7.99 ± 1.28	7.66 ± 1.49
4. Carefully read the label	7.95 ± 1.39	7.56 ± 1.61
5. Halal label is a must for any processed foods.	7.94 ± 1.81	7.66 ± 1.72

การวิเคราะห์การจำแนกผู้บริโภคผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง

จากการวิเคราะห์การจำแนกผู้บริโภคผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋อง ด้วยวิธีการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่ม (Two-step cluster analysis) ด้วยข้อมูลทางประชากรศาสตร์และวิถีการดำเนินชีวิตพบว่าสามารถจำแนกกลุ่มผู้บริโภคในแต่ละเมืองออกเป็น 2 กลุ่มโดยลักษณะทางประชากรศาสตร์และวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคในเมืองจาการ์ตากลุ่มที่ 1 (Cluster 1) มีลักษณะประชากรศาสตร์ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงสถานภาพโสด อายุน้อยกว่า 23ปี นับถือศาสนาอิสลาม และส่วนมากเป็นนักเรียนนักศึกษาการศึกษาสูงสุดระดับปริญญาตรีซึ่งมีรายได้ครอบครัวต่อเดือนน้อยกว่า 1.5 ล้านรูเปียห์อินโดนีเซีย พักอาศัยอยู่ในเมือง และเมื่อพิจารณา Factor score ทำให้ทราบว่ากลุ่มผู้บริโภคนี้มีวิถีการดำเนินชีวิตคือ เป็นผู้ใส่ใจรักสุขภาพ รองลงมาคือชอบการเข้าสังคม ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มที่ 2 (Cluster 2) ที่ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงแต่งงานมีบุตรแล้ว อายุอยู่ในช่วง 23-40 ปี ประกอบอาชีพเป็นพนักงานบริษัท มีรายได้ครอบครัวต่อเดือน 3-7 ล้านรูเปียห์อินโดนีเซีย มีวิถีการดำเนินชีวิตที่ให้ความสำคัญกับการรักสุขภาพเช่นกัน แต่รองลงมาคือ การเปิดรับสิ่งใหม่และให้ความสำคัญกับคุณภาพและเครื่องหมายฮาลาล

ในขณะที่เมืองสุราบายากลุ่มผู้บริโภคกลุ่มที่ 1 (Cluster 1) มีลักษณะประชากรศาสตร์ คือ เพศหญิงที่มีสถานภาพโสด นับถือศาสนาอิสลาม มีอายุน้อยกว่า 23 ปี เป็นนักเรียนซึ่งมีการศึกษาสูงสุดในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย รายได้ครอบครัวต่อเดือนน้อยกว่า 1.5 ล้านรูเปียห์อินโดนีเซีย พักอาศัยอยู่ในเมือง มีวิถีการดำเนินชีวิตคือ เป็นผู้ชอบเข้าสังคมและชอบเปิดรับสิ่งใหม่ ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มที่ 2 (Cluster 2) ซึ่งมีลักษณะเป็นเพศหญิงที่มีสถานภาพแต่งงานมีบุตรแล้ว มีช่วงอายุ 23-40 ปี มีธุรกิจส่วนตัว ซึ่งมีรายได้ครอบครัวต่อเดือน3-7 ล้านรูเปียห์อินโดนีเซีย แต่มีวิถีการดำเนินชีวิตคือ เป็นผู้ชอบเข้าสังคมและชอบเปิดรับสิ่งใหม่เช่นกัน แต่ยังคงให้ความสำคัญกับคุณภาพสินค้าและตราฮาลาลและรักสุขภาพอีกด้วย (Table 3)

Table 3 Cluster analysis of Indonesian consumers by demographic and lifestyle

Demographic	Jakarta		Surabaya	
	Cluster 1 (n=104)	Cluster 2 (n=203)	Cluster 1 (n=133)	Cluster 2 (n=238)
- Gender	Female 58%	Female 53%	Female 72%	Female 55%
- Status	Single 100%	Married 48%	Single 95%	Married 51%
- Religion	Islam 81%	Islam 67%	Islam 86%	Islam 74%
- Age	< 23 years 49%	23-40 years 65%	< 23 years 83%	23-40 years 85%
- Occupation	Student 83%	Employee 30%	Student 74%	Employee 34%
- Education	Bachelor 67%	Bachelor 59%	High school 53%	Bachelor 58%
- Revenue	< 1.5 M. IDR 55%	3-7 M. IDR 40%	< 1.5 M. IDR 58%	3-7 M. IDR 41%
- Home location	Resident 72%	Resident 64%	Resident 61%	Resident 62%
Lifestyle group				
- Open mind	-0.09[1/]	0.05	-	-
- Health concerned	-0.21	0.10	-	-
- Socialize	0.15	-0.03	-	-
- Quality & Halal concerned	0.13	-0.05	-	-
- Quality & Halal & health concerned	-	-	0.03	0.04
- Socialize & Open mind	-	-	-0.07	0.04

[1/] Factor score

การกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาด

จากการจำแนกกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายจากข้อมูลประชากรศาสตร์และวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องของชาวอินโดนีเซียทั้งในเมืองจาการ์ตาและสุราบายา พบว่าสามารถจำแนกกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มผู้บริโภคที่มีอายุน้อยเป็นนักศึกษา มีรายได้น้อย กับกลุ่มผู้บริโภคที่มีอายุมากเป็นพนักงานบริษัท มีรายได้มาก ซึ่งวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคคล้ายคลึงกัน คือ รักสุขภาพและชอบเปิดรับสิ่งใหม่ ดังนั้นผู้ประกอบการที่จะส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องไปยังประเทศอินโดนีเซียควรกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดออกเป็น 2 แนวทางให้เหมาะสมกับผู้บริโภคแต่ละกลุ่ม โดยกลุ่มผู้บริโภคที่มีอายุน้อยรายได้น้อย ให้ความสำคัญกับสุขภาพและเปิดรับสิ่งใหม่ ควรใช้กลยุทธ์ทางการตลาดที่มุ่งเน้นตัวผลิตภัณฑ์และการส่งเสริมการตลาดเป็นสำคัญโดยเฉพาะการเลือกใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพมีคุณค่าทางโภชนาการที่ดี เช่น ใช้ปลาทูน่าแทนปลาซาร์ดีนหรือปลาแมคเคอเรล การใช้วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ หลีกเลี่ยงการใช้สารปรุงแต่งการเติมสารอาหารที่มีประโยชน์หรือลดใช้สารบางชนิด เช่น ลดปริมาณโซเดียมหรือผงชูรส ลดปริมาณไขมัน มีการโฆษณาข้อดีของผลิตภัณฑ์ทางด้านสุขภาพลงบนฉลากและควรเพิ่มกลยุทธ์ด้านราคาและบรรจุภัณฑ์ โดยการปรับลดราคาขายสินค้าจากการลดขนาดหรือปริมาณของบรรจุภัณฑ์ลงเพื่อผู้บริโภคที่มีรายได้น้อยสามารถซื้อได้ แต่ราคายังคงเหมาะสมกับคุณภาพของสินค้า อีกทั้งยังควรออกแบบบรรจุภัณฑ์ให้แปลกใหม่สวยงามดึงดูดให้ผู้บริโภคเกิดความต้องการซื้อสินค้า ส่วนกลุ่มผู้บริโภคที่มีอายุมากและมีรายได้มากกว่า จะใช้กลยุทธ์ในการมุ่งเน้นด้านผลิตภัณฑ์และการออกแบบบรรจุภัณฑ์เช่นเดียวกับกลุ่มแรกโดยไม่ต้องปรับลดราคาแต่ควรสร้างภาพพจน์ของสินค้าให้เป็นพรีเมี่ยม จำหน่ายในซุปเปอร์มาเก็ตและร้านสะดวกซื้อ และเมื่อพิจารณาวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคที่อายุมากในเมืองสุราบายาจะเห็นได้ว่า ผู้บริโภคให้ความสำคัญเกี่ยวกับคุณภาพและตราฮาลาล ดังนั้น หากผู้ประกอบการให้ความสำคัญในด้านการรับรองมาตรฐานสากลต่างๆ เช่น GMP HACCP ISO และผ่านการรับรองเครื่องหมายฮาลาลจากประเทศอินโดนีเซียได้ก็เพิ่มความเชื่อมั่นจากผู้บริโภคในอินโดนีเซียได้ทั้ง 2 กลุ่มและเพิ่มโอกาสในการส่งออกผลิตภัณฑ์ปลากระป๋องไปยังประเทศอินโดนีเซีย

สรุป

การศึกษาพฤติกรรม วิถีการดำเนินชีวิตและปัจจัยทางการตลาดที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องของผู้บริโภคชาวอินโดนีเซียในเมืองจาการ์ตาและสุราบายาเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมการซื้อและบริโภคปลากระป๋องตลอดจนวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภคชาวอินโดนีเซีย และจำแนกกลุ่มผู้บริโภคออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มผู้บริโภคที่มีอายุน้อยที่ใส่ใจสุขภาพและเปิดรับสิ่งใหม่ มีรายได้น้อย กับกลุ่มที่มีอายุมากที่ใส่ใจสุขภาพและเปิดรับสิ่งใหม่ มีรายได้สูงโดยมีการกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสมกับผู้บริโภคทั้งสองกลุ่ม เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นแนวทางให้แก่ผู้ประกอบการไทยที่ส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารฮาลาลประเภทปลากระป๋องไปยังตลาดอินโดนีเซีย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. อัจฉรา เกษสุวรรณ สำหรับคำปรึกษาและการช่วยเหลือทุกอย่างในงานวิจัยนี้ตลอดมา และขอขอบคุณมูลนิธิเพื่อสถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม ในการสนับสนุนทุนการเดินทางสำรวจเก็บ

แบบสอบถามที่ประเทศอินโดนีเซียทั้งเมืองจาการ์ตาและสุราบายา ภายใต้โครงการ “โครงการศึกษาพฤติกรรมผู้บริโภคและอุตสาหกรรมอาหารในประเทศอินโดนีเซีย”

เอกสารอ้างอิง

กรมประมง. 2557. **ข้อมูลการส่งออกสินค้าประมง ปี 2550-2557 (ม.ค.-พ.ค.)**. แหล่งที่มา: http://www.fisheries.go.th/foreign/index.php?option=com_content&view=category&id=16&Itemid=14, 4 กรกฎาคม 2558.

ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย. 2556. **ตลาดอาหารฮาลาลในอินโดนีเซีย...โอกาสรออยู่ข้างหน้า**. แหล่งที่มา:http://www.exim.go.th/doc/newsCenter/43916.pdf, 4 กรกฎาคม 2558.

Carlucci, D., G. Nocella, B. De Devitiis, R. Viscecchia, F.Bimbo and G. Nardone. 2015. Consumer Purchasing BehaviourTowards Fish and Seafood Products.Patterns and Insights from a Sample of International Studies. **Appetite** 84 (2015): 212-227.

EuromonitorInternational. 2014. **Canned/Preserved Food in Indonesia**. Available Source: http://www.euromonitor.com/canned-preserved-food-in-indonesia/report, July 2, 2015.

Global Islamic Finance Report.2013.**The Global Halal Industry: an overview**. Available Source: http://www.gifr.net/gifr2013/ch_13.PDF, October 17, 2015.

Ismoyowati,D. 2014. Halal Food Marketing: A Case Study on Consumer Behavior of Chicken-based Processed Food Consumption in Central Part of Java, Indonesia. **Agriculture and Agricultural Science Procedia** 3 (2015):169 – 172.

Mohamed, Z., G. Rezai and M.N. Shamsudin and E. Chiew. 2008. Halallogo and consumers' confidence: What are the important factors?.**Economic and Technology ManagementReview**. Vol.3 (2008): 37-45.

Mohani, A., H. Ismail, M. Mustapha and H. Kusuma. 2012. Indonesian Small Medium Enterprises (SMEs) and Perceptions on Halal Food Certification.**African Journal of Business Management**.1500-1492: (16)7.

Pew Research Center.2015.**The Future of World Religions: Population Growth Projections, 2010-2050**. Available Source:http://www.pewforum.org/2015/04/02/religious-projections-2010-2050/, October 16, 2015.

สมรรถนะของโซ่อุปทานอุตสาหกรรมอาหารฮาลาลไทย

Thai Halal Food Supply Chain Performance

ธรรมรัตน์ ปิ่นสากล[1*] และ รวิพิมพ์ ฉวีสุข[1]

Thammarat Pinsakol[1*] and Ravipim chaveesuk[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์สมรรถนะของโซ่อุปทานอุตสาหกรรมอาหารฮาลาลในประเทศไทยด้วยดัชนีชี้วัดจากแบบจำลองอ้างอิงกระบวนการโซ่อุปทาน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าอุตสาหกรรมผู้ผลิตอาหารฮาลาลมีความสามารถในการตอบสนองต่อคำสั่งซื้อของลูกค้าได้ถูกต้องสมบูรณ์ร้อยละ 96.5 ใช้เวลาในการตอบสนองต่อคำสั่งซื้อของลูกค้าเฉลี่ย 16 วัน และมีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคำสั่งซื้อที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ในเวลาเฉลี่ย 3 วัน มีอัตราผลตอบแทนกำไรสุทธิต่อยอดขายร้อยละ 3.21 และมีต้นทุนโลจิสติกส์ทั้งหมดต่อยอดขายร้อยละ 12.5 ผู้ประกอบการมีความร่วมมือในการแลกเปลี่ยนข้อมูลและตัดสินใจร่วมกับลูกค้ามากกว่ากับผู้ส่งมอบ บริษัทผลิตสินค้าอาหารที่มีเนื้อสัตว์เป็นส่วนประกอบมีสมรรถนะที่ดีกว่าบริษัทที่ผลิตสินค้าอาหารที่ไม่มีเนื้อสัตว์เป็นส่วนประกอบจากการมีความร่วมมือกับผู้ส่งมอบและลูกค้าในระดับสูงกว่า บริษัทขนาดใหญ่มีสมรรถนะดีกว่าบริษัทขนาดกลางและเล็กในเรื่องของความสมบูรณ์ในการส่งมอบ และความสามารถในการทำกำไร เนื่องจากมีกำลังการผลิต มีอำนาจต่อรองกับผู้ส่งมอบและลูกค้าสูงกว่า และมีความร่วมมือกับผู้ส่งมอบและลูกค้าในระดับสูงกว่า บริษัทขนาดกลางและขนาดเล็กควรใส่ใจในการแลกเปลี่ยนข้อมูลและการตัดสินใจร่วมกันกับทั้งผู้ส่งมอบวัตถุดิบและลูกค้า

ABSTRACT

This study is carried out to evaluate the supply chain performance of Thai halal food industry, based on SCOR model performance metrics. Thai halal food manufacturers have 96.5 percent perfect order fulfillment with an average order fulfillment cycle time of 16 days. Upside supply chain flexibility by 10 percent can be achieved in 3 days on average. Net profit margin is at 3.21 percent of the sales while logistics costs constitute 12.5 percent of the sales. Most manufacturers cooperated more with their customers rather than their suppliers. Meat based manufacturers have better performance than non-meat based manufacturers due to higher cooperation with their customers and suppliers. In addition, large firms have higher perfect order fulfillment and profitability than small or medium firms size due to their higher capacity and bargaining power as well as cooperation with their customers and suppliers. SME should focus on information sharing and joint decision-making with suppliers and customers.

Key Words: halal food, performances, SCOR model

*Corresponding author; e-mail address: **pinsagon2534@gmail.com**

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ตลาดอาหารฮาลาลในภูมิภาคอาเซียนมีขนาดใหญ่ ประกอบด้วยประชากรมุสลิมประมาณ 400 ล้านคน หรือร้อยละ 66.7 ของประชากรอาเซียนทั้งหมด (Economic Intelligence Center, 2015) มูลค่าตลาดอาหารฮาลาลของภูมิภาคอาเซียนนั้นมีสัดส่วนร้อยละ 16.8 ของมูลค่าตลาดอาหารฮาลาลโลกประมาณ 164 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ และมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง (ฐานข้อมูลเพื่อสนับสนุนการพัฒนาฮาลาลไทย, 2556) การจัดการโซ่อุปทานอาหารฮาลาลนั้นคล้ายคลึงกับโซ่อุปทานอาหารทั่วไปแต่ต้องควบคุมให้กระบวนการผลิตต้องสอดคล้องกับหลักศาสนาอิสลามตลอดห่วงโซ่อุปทานด้วย เนื่องจากส่งผลกระทบต่อการเลือกซื้อของผู้บริโภค (Jaafar, 2011) เพื่อรองรับการขยายตัวของตลาดฮาลาลการพัฒนาสมรรถนะโซ่อุปทานจึงเป็นสิ่งสำคัญ Slusarczyk and Kot (2012) ได้กล่าวว่าการวัดประสิทธิภาพโซ่อุปทานเป็นกิจกรรมสำคัญในการเพิ่มประสิทธิผลของการดำเนินงานและทำให้สามารถทราบถึงจุดอ่อนจุดแข็งของโซ่อุปทาน

แบบจำลองอ้างอิงกระบวนการโซ่อุปทาน (Supply Chain Operation Reference Model: SCOR Model) ได้นำเสนอดัชนีชี้วัดสมรรถนะ (Metrics) เพื่อใช้ประเมินสมรรถนะหรือความสามารถขององค์กรใน 5 คุณลักษณะ คือ ความน่าเชื่อถือของโซ่อุปทาน (Reliability) การตอบสนองของโซ่อุปทาน (Responsiveness) ความคล่องตัวของโซ่อุปทาน (Agility) ต้นทุนโซ่อุปทาน (Supply Chain Cost) และการบริหารสินทรัพย์ของโซ่อุปทาน (Supply Chain Asset Management) โดยคุณลักษณะ 3 ประการแรกเป็นการวัดระดับการให้บริการลูกค้า ในขณะที่คุณลักษณะที่ 4 และ 5 เป็นการวัดการดำเนินงานภายใน ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพขององค์กรจะนำไปสู่การเลือกใช้กลยุทธ์ที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาและปรับปรุงการดำเนินงานรวมถึงการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในองค์กร (พรธิภา, 2554; Supply Chain Council, 2008) Vereecke and Muylle (2006) สรุปว่าถ้ามีความร่วมมือกับทั้งผู้ส่งมอบและลูกค้าจะสามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะโซ่อุปทานได้ทั้งหมดโดยเฉพาะในด้านการจัดส่ง และคุณภาพสินค้า นอกจากนี้ยังสามารถแก้ไขปัญหาความขัดแย้งในการทำงานและการมีส่วนร่วมในการตัดสินใจและการวางแผนดำเนินงานได้ด้วย งานวิจัยนี้ศึกษาภาพรวมสมรรถนะของกระบวนการดำเนินงานภายใน และระดับการให้บริการลูกค้า และสัดส่วนความร่วมมือระหว่างผู้ผลิตอาหารฮาลาลกับผู้ส่งมอบและลูกค้า เพื่อกำหนดแนวทางในการพัฒนาศักยภาพของโซ่อุปทานอุตสาหกรรมอาหารฮาลาล

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เก็บรวบรวมข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล
   1.1 พัฒนาแบบสัมภาษณ์เพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะของโซ่อุปทานอุตสาหกรรมอาหารฮาลาล 3 ส่วนได้แก่ 1). ข้อมูลพื้นฐานของบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล 2). ระบบการดำเนินงานภายในและระดับการให้บริการลูกค้าของบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล 3). ความร่วมมือระหว่างผู้ผลิตอาหารฮาลาลกับผู้ส่งมอบและลูกค้า
2. การเก็บข้อมูลด้วยการสุ่มตัวอย่างแบบตามสะดวกโดยการสัมภาษณ์ 30 บริษัท
3. วิเคราะห์ข้อมูล
   3.1 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสมรรถนะของบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาลในรูปพรรณนาสถิติ
4. เปรียบเทียบสมรรถนะของบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในกรณีที่ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ หรือ Kruskal-Wallis ในกรณีที่ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบ

ไม่ปกติ และเปรียบเทียบความร่วมมือของผู้ผลิตอาหารฮาลาลกับผู้ส่งมอบวัตถุดิบและลูกค้าด้วยการทดสอบความเป็นอิสระ (Chi- Square Test) ตามเกณฑ์ดังนี้

4.1 ประเภทของบริษัท ได้แก่ บริษัทผลิตสินค้าอาหารที่มีเนื้อสัตว์เป็นส่วนประกอบ (Meat based manufacturer) เช่น บริษัทผลิตเนื้อสัตว์แปรรูปหรือเนื้อสัตว์แช่แข็ง และบริษัทที่ผลิตสินค้าอาหารที่ไม่มีเนื้อสัตว์เป็นส่วนประกอบ (Non-meat based manufacturer) ได้แก่ บริษัทผลิตผักและผลไม้แปรรูป ซึ่งวัตถุดิบมีลักษณะเฉพาะฤดูกาล

4.2 ขนาดของบริษัท ได้แก่ บริษัทขนาดเล็ก มีสินทรัพย์ถาวรไม่เกิน 50 ล้านบาท หรือมีการจ้างงานไม่เกิน 50 คน บริษัทขนาดกลาง มีสินทรัพย์ถาวร 51 ถึง 200 ล้านบาท หรือมีการจ้างงาน 51 ถึง 200 คน บริษัทขนาดใหญ่มีทรัพย์สินถาวรมากกว่า 200 ล้านบาท หรือมีการจ้างงานมากกว่า 200 คน (กฎกระทรวงอุตสาหกรรม, 2545)

5. นำเสนอแนวทางในการพัฒนาสมรรถนะของบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ภาพรวมของอุตสาหกรรมอาหารฮาลาล

ผลจากการเก็บข้อมูลโดยการสัมภาษณ์ผู้ผลิตอาหารฮาลาลทั่วประเทศจำนวน 30 บริษัท สามารถแบ่งตามประเภทสินค้าได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มสินค้าที่ปราศจากเนื้อสัตว์เป็นส่วนประกอบเช่น นมถั่วเหลือง ผักและผลไม้แปรรูป และกลุ่มสินค้าที่มีเนื้อสัตว์เป็นส่วนประกอบเช่น ปลากระป๋อง ลูกชิ้นปลาและเนื้อไก่แปรรูป มีการผลิตภายใต้ตราสินค้าของตัวเองร้อยละ 60 ผลิตภายใต้ตราสินค้าของลูกค้าร้อยละ 30 และออกแบบสินค้าและผลิตตามลูกค้าร้อยละ 10 อายุการเก็บสินค้าโดยเฉลี่ย 17 เดือน จำหน่ายผลิตภัณฑ์ภายในประเทศร้อยละ 66 และต่างประเทศร้อยละ 34 การจัดจำหน่ายในประเทศส่วนใหญ่นั้นผ่านทางผู้กระจายสินค้า ไฮเปอร์มาเก็ตและซุปเปอร์มาเก็ตได้แก่ Big C, Makro, Tesco Lotus, Villa Market และTops และร้านขายของฝากร้อยละ 65 ผ่านร้านสะดวกซื้อได้แก่ 7-eleven และ MaxValu ร้านอาหารและอื่นๆร้อยละ 35 ตลาดต่างประเทศได้แก่ ประเทศญี่ปุ่น รองลงมาคือ ออสเตรเลีย อเมริกา และอาเซียน ผ่านทางเทรดเดอร์และผู้นำเข้าจากประเทศปลายทางร้อยละ 59

2. สมรรถนะโซ่อุปทานอาหารฮาลาล

การผลิตของบริษัทผลิตสินค้าฮาลาลของไทยอยู่ในรูปแบบผลิตตามคำสั่งซื้อร้อยละ 23 ผลิตเพื่อรอจำหน่ายร้อยละ 23 ออกแบบตามคำสั่งซื้อและผลิตเพื่อรอจำหน่ายร้อยละ 4 ผลิตเพื่อรอคำสั่งซื้อร้อยละ 4 และส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบผลิตตามคำสั่งซื้อและผลิตเพื่อรอจำหน่ายร้อยละ 46 ภาพรวมการดำเนินงานทั่วไปและระดับการให้บริการลูกค้าของบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล แสดงดัง Table 1

Table 1 Supply chain performance metrics of Halal food producers

Metrics	Min	Max	Mean	S.D.	95%CI
1. Perfect order fulfillment (%)	80	100	96.53	11.77	96.53±2.07
2. Order fulfillment cycle time (days)	1	60	15.97	17.76	16.00±6.64
3. Upside supply chain flexibility by 10 % (days)	1	15	2.48	3.73	2.48±1.42

Metrics	Min	Max	Mean	S.D.	95%CI
4. Logistic costs (% of sales)	8	20	12.5	4.75	12.5±3.97
5. Return on asset (%)	-7.38	13.59	4.45	4.48	4.45±2.17
6. Profit margin (%)	-4.93	13.69	3.21	4.16	3.21±1.85

1 = reliability measure; 2 = responsiveness; 3= agility measure; 4 = supply chain cost; 5-6 = asset management measure

โดยรวมแล้วผู้ประกอบการอาหารฮาลาลไทยนั้น มีความสามารถในการตอบสนองต่อคำสั่งซื้อของลูกค้าได้ถูกต้องสมบูรณ์ร้อยละ 96.5 และเวลาที่ใช้ในการตอบสนองคำสั่งซื้อของลูกค้าเฉลี่ย คือ 16 วัน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีมาก และถ้ามีปริมาณคำสั่งซื้อเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 จะใช้เวลาเฉลี่ยไม่เกิน 3 วันในการตอบสนองคำสั่งซื้อ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกลุ่มอุตสาหกรรมอาหาร (สำนักงานโลจิสติกส์, 2556) และมีต้นทุนโลจิสติกส์ต่อยอดขายเฉลี่ยร้อยละ 12.5 พบว่าต้นทุนการขนส่งสูงที่สุดเฉลี่ยร้อยละ 36 ต้นทุนการจัดการคลังสินค้าเฉลี่ยร้อยละ 21 ต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังเฉลี่ยร้อยละ 18 ต้นทุนการจัดซื้อจัดหาเฉลี่ยร้อยละ 17 และต้นทุนการจัดการคำสั่งซื้อและบริการลูกค้าเฉลี่ยร้อยละ 8 นอกจากนี้พบว่าอัตราผลตอบแทนต่อสินทรัพย์รวมอยู่ในระดับต่ำกว่ามาตรฐานของกลุ่มอุตสาหกรรมอาหาร (สำนักงานโลจิสติกส์, 2556)

ผลการวิเคราะห์ความร่วมมือระหว่างบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล ผู้ส่งมอบ และลูกค้า ในด้านการแลกเปลี่ยนข้อมูลและการตัดสินใจร่วมกันในโซ่อุปทานเป็นดัง Table 2

Table 2 Cooperations between manufacturers and their suppliers or customers

Cooperation	Major[1]Supplier	Minor[2]Supplier	Customers	
	(%)	(%)	Local (%)	International (%)
Information Sharing				
Customer order quantity	56.7	42.9	62.1	79.2
Demand forecast	56.7	42.9	55.2	75.0
Point of sales	20.0	14.3	37.9	50.0
Selling price	53.3	35.7	44.8	58.3
Inventory holding cost	16.7	14.3	24.1	25.0
Inventory levels	16.7	21.4	37.9	33.3
Reorder point	23.3	21.4	34.5	33.3
Customer order status	40.0	25.0	44.8	50.0
Delivery schedule	63.3	46.4	58.6	75.0
Raw material shortage	50.0	39.3	51.7	75.0
Joint decision-making				
Order quantity	36.7	17.9	34.5	45.8
Demand forecast	26.7	17.9	41.4	62.5
Wrong forecasts Solving	23.3	14.3	37.9	50.0

Cooperation	Major[1]Supplier (%)	Minor[2]Supplier (%)	Customers	
			Local (%)	International (%)
Product varieties planning	23.3	21.4	48.3	58.3
Selling price setting	30.0	17.9	34.5	45.8
Promotions establishment	6.7	14.3	41.4	62.5
Inventory levels	16.7	14.3	20.7	37.5
Inaccurate order correction	26.7	17.9	34.5	50.0

1 = major raw material; 2 = packaging or food ingredients

ผู้ประกอบการมีความร่วมมือในด้านการแลกเปลี่ยนข้อมูล (เฉลี่ยร้อยละ 42.7) มากกว่าการตัดสินใจร่วมกัน (เฉลี่ยร้อยละ 32.2) และจะให้ความสำคัญกับลูกค้า (เฉลี่ยร้อยละ 47.5) มากกว่าผู้จัดส่ง (เฉลี่ยร้อยละ 28.5) และกับผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลัก (เฉลี่ยร้อยละ 32.6) มากกว่าผู้ส่งมอบวัตถุดิบรอง (เฉลี่ยร้อยละ 24.4) เนื่องจากวัตถุดิบหลักนั้นมีความเฉพาะเจาะจงต่อสินค้าและส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตโดยตรง ส่วนผู้ส่งมอบวัตถุดิบรองซึ่งมีหลายราย จึงมีอำนาจในการต่อรองกับผู้ส่งมอบสูง ผู้ประกอบการเน้นการแลกเปลี่ยนข้อมูลความต้องการของลูกค้า ข้อมูลการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้า และตารางการจัดส่งสินค้ากับผู้ส่งมอบวัตถุดิบ เนื่องจากจะช่วยให้ทั้งสองฝ่ายคาดคะเนปริมาณวัตถุดิบที่ต้องจัดหาหรือจัดส่งในช่วงเวลาที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง ผู้ประกอบการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับลูกค้าต่างประเทศ (เฉลี่ยร้อยละ 53.7) มากกว่าลูกค้าในประเทศ (เฉลี่ยร้อยละ 41.4) โดยเฉพาะข้อมูลความต้องการของลูกค้า การพยากรณ์ความต้องการของลูกค้า ตารางจัดส่งสินค้า และข้อมูลการขาดแคลนหรือสะดุดของการส่งมอบสินค้า เพื่อสามารถวางแผนผลิตที่ตอบสนองความต้องการทั้งด้านคุณภาพและปริมาณภายในเวลาที่กำหนด และวางแผนรับมือการขาดแคลนสินค้าล่วงหน้าได้

ในด้านการร่วมกันตัดสินใจพบว่าผู้ประกอบการเน้นการตัดสินใจร่วมกับลูกค้าต่างประเทศมากกว่าลูกค้าในประเทศ โดยเฉพาะการพยากรณ์ความต้องการของลูกค้า การวางแผนการจัดโปรโมชั่น การตัดสินใจเกี่ยวกับระดับสินค้าคงคลังและการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับคำสั่งซื้อที่ผิดพลาด เพื่อใช้ในการวางแผนการจัดซื้อจัดหาวัตถุดิบและการผลิต

3. การเปรียบเทียบสมรรถนะของบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล

3.1 ด้านการดำเนินงานภายในและระดับการให้บริการลูกค้าจำแนกตามประเภทและขนาดของบริษัท ผลการเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะของบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาลจำแนกตามประเภทของบริษัทดัง (Table 3)

Table 3 Comparison of supply chain performance metrics based on the firm's type and size

Metrics	Type		Size		
	Non-meat based (n=19)	Meat based (n=11)	Small (n=15)	Medium (n=6)	Large (n=9)
1. Perfect order fulfillment (%)	95.74a	97.91a	96.00a	94.83a	98.56a
2. Order fulfillment cycle time (days)	17.20a	13.91a	9.13a	26.33a	20.54a

Metrics	Type		Size		
	Non-meat based (n=19)	Meat based (n=11)	Small (n=15)	Medium (n=6)	Large (n=9)
3.Upside supply chain flexibility by 10%(days)	3.39b	1.00a	1.40a	5.6b	2.56ab
4.Logistic costs (percent of sales)	14.50a	10.50a	11.60a	N/A	14.00a
5.Return on asset (percent)	2.98a	6.57a	4.05a	1.73a	6.57a
6.Profit margin (percent)	2.64a	3.76a	2.16a	1.79a	4.42a

1 = reliability measure; 2 = responsiveness; 3= agility measure; 4 = supply chain cost; 5-6 = asset management measure

Numbers followed by different letter are significantly different ($p \leq 0.05$)

พบว่าบริษัทที่ใช้เนื้อสัตว์เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตมีระยะเวลาในการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่เพิ่มขึ้น 10 % สั้นกว่าบริษัทไม่ใช้เนื้อสัตว์เป็นวัตถุดิบในการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้บริษัทที่ใช้เนื้อสัตว์เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตมีความสมบูรณ์ในการส่งมอบสินค้าสูงกว่า มีเวลาในการตอบสนองต่อคำสั่งซื้อสั้นกว่า มีต้นทุนโลจิสติกส์ต่ำกว่า มีอัตราตอบแทนจากสินทรัพย์รวมและกำไรสุทธิต่อยอดขายสูงกว่าบริษัทที่ผลิตสินค้าปราศจากเนื้อสัตว์ เนื่องจากพืชผักและผลไม้มีลักษณะเป็นฤดูกาล มีความเปราะบางในการเก็บเกี่ยวและขนส่งไม่สามารถเก็บรักษาในรูปแบบการแช่แข็งได้ จึงทำให้การจัดหาและจัดเก็บวัตถุดิบ รวมถึงวางแผนการผลิตยากกว่า และมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงความต้องการของลูกค้าต่ำกว่า

ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างบริษัทขนาดใหญ่และขนาดกลางและขนาดเล็ก พบว่าบริษัทขนาดกลางใช้ระยะเวลาในการตอบสนองต่อการปรับเปลี่ยนปริมาณการผลิตนานที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลิตตามคำสั่งซื้อเท่านั้นถึงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับขนาดใหญ่ที่ร้อยละ 11 และขนาดเล็กที่ร้อยละ 27 การจัดหาวัตถุดิบและปริมาณการผลิตจึงเป็นไปตามรอบการผลิต ส่งผลให้ตอบสนองต่อคำสั่งซื้อที่เปลี่ยนแปลงได้ช้ากว่าบริษัทขนาดใหญ่ที่มีการผลิตเพื่อรอจำหน่ายในสัดส่วนที่สูงกว่าและขนาดเล็กที่มีปริมาณการผลิตต่ำ นอกจากนี้ร้อยละ17 ของบริษัทขนาดกลางนั้นผลิตเพื่อส่งออกทั้งหมดซึ่งอาจจะส่งผลต่อความไม่แน่นอนในด้านความต้องการของลูกค้า ความผันผวนของค่าเงินและการจัดส่ง บริษัทขนาดใหญ่มีความสมบูรณ์ในการส่งมอบสินค้าสูงกว่า เนื่องจากมีกำลังการผลิตสูง และมีความสามารถในการจัดการโลจิสติกส์และมีอำนาจต่อรองกับผู้ให้บริการโลจิสติกส์สูงกว่า นอกจากนี้บริษัทขนาดใหญ่มีปริมาณการผลิตและมีความหลากหลายสูง จะใช้เวลาในการตอบสนองคำสั่งซื้อสูงกว่าขนาดเล็กแต่น้อยกว่าบริษัทขนาดกลาง บริษัทขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตต่ำ สินค้ามีความหลากหลายต่ำและมีปริมาณการสั่งซื้อไม่มากอีกทั้งขายภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ จึงมีระยะเวลาในการตอบสนองต่อคำสั่งซื้อของลูกค้าต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามจำนวนบริษัทในแต่ละขนาดแตกต่างกันอยู่บ้างการนำผลไปใช้จึงควรทำด้วยความระมัดระวัง

3.2 ความร่วมมือระหว่างบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล ผู้ส่งมอบ และลูกค้า

ผลการวิเคราะห์ความเป็นอิสระของความร่วมมือระหว่างบริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาล ผู้ส่งมอบ และลูกค้ากับประเภทและขนาดของบริษัทแสดงใน Table 4, 5 and 6

Table 4 Cooperation between manufacturers and suppliers based on type

Cooperation	Practice	Alliance	Non-meat based (%)	Meat based (%)
Joint decision-making	Product varieties planning	Minor suppliers	10.5a	44.4b

Numbers followed by different letter are significantly different ($p \leq 0.05$)

บริษัทที่ใช้เนื้อสัตว์เป็นวัตถุดิบในการผลิตมีการร่วมกันตัดสินใจในรายละเอียดและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์กับผู้ส่งมอบรองมากกว่าบริษัทที่ไม่ใช้เนื้อสัตว์เป็นวัตถุดิบ ดังนั้นจะสามารถจัดหาส่วนประกอบหรือบรรจุภัณฑ์ให้ได้ตรงความต้องการสูงกว่า

Table 5 Cooperations between manufacturers and suppliers based on size

Cooperation	Practice	Alliance	Small	Medium	Large
Information Sharing	Point of sales	Major suppliers	6.7a	0.0a	55.3b
	Selling price	Major suppliers	33.3a	50.0ab	88.9b
	Customer order status	Major suppliers	13.3a	66.7b	66.7b
	Delivery schedule	Major suppliers	40.0a	66.7ab	100.0b
	Customer order quantity	Minor suppliers	20.0a	50.0ab	85.7b
	Demand forecast	Minor suppliers	26.7a	33.3ab	85.7b
	Selling price	Minor suppliers	13.3a	33.3ab	85.7b
	Inventory levels	Minor suppliers	6.7a	16.7ab	57.1b
	Reorder point	Minor suppliers	6.7a	16.7ab	57.1b
	Customer order status	Minor suppliers	6.7a	33.3ab	57.1b
	Delivery schedule	Minor suppliers	20a	66.7b	85.7b
	Raw material shortage	Minor suppliers	13.3a	50.0ab	85.7b
Joint decision-making	Inaccurate order correction	Major suppliers	6.7a	33.3ab	55.6b
	Demand forecast	Minor suppliers	6.7a	0.0a	57.1b
	Promotions establishment	Minor suppliers	6.7a	0.0a	42.9b
	Inaccurate order correction	Minor suppliers	6.7a	0.0a	57.1b

Numbers followed by different letter are significantly different ($p \leq 0.05$)

โดยรวมบริษัทขนาดใหญ่และขนาดกลางจะมีความร่วมมือกับผู้ส่งมอบสูงกว่าบริษัทขนาดเล็ก (Table 5) ทั้งนี้พบว่า บริษัทขนาดใหญ่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลและการตัดสินใจร่วมกับผู้ส่งมอบสูงกว่า บริษัทขนาดกลางและขนาดเล็ก โดยเฉพาะการแลกเปลี่ยนข้อมูล ณ จุดขาย กับผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลัก และ การร่วมกันพยากรณ์ความต้องการของลูกค้า การร่วมกันจัดโปรโมชั่นและร่วมกันแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับคำสั่งซื้อที่ผิดพลาดกับผู้ส่งมอบวัตถุดิบหลักและรอง ส่งผลให้ทั้งสองฝ่ายคาดคะเนปริมาณวัตถุดิบที่ต้องการใช้ได้อย่างแท้จริง และอาจ

ลดปรากฏการแส้ม้า (Bull Whip Effect) ทำให้ลดต้นทุนในการสั่งซื้อและจัดเก็บวัตถุดิบคงคลัง และมีมาตรการหรือสามารถแก้ปัญหาจากการสั่งซื้อที่ผิดพลาดได้อย่างรวดเร็ว จึงมีอัตราส่วนผลตอบแทนจากสินทรัพย์สูงที่สุด ในขณะที่บริษัทขนาดกลางไม่มีความร่วมมือดังกล่าวและบริษัทขนาดเล็กมีความร่วมมือต่ำ อาจส่งผลให้บริษัทขนาดกลางมีความสมบูรณ์ในการส่งมอบสินค้า ความสามารถในการจัดการทรัพย์สินและการตอบสนองคำสั่งซื้อด้อยกว่าบริษัทขนาดเล็ก

บริษัทขนาดเล็กมีสัดส่วนความร่วมมือกับลูกค้าในระดับต่ำ (Table 6) โดยเฉพาะกับลูกค้าต่างประเทศ เนื่องจากมีกำลังการผลิตที่ต่ำ สินค้าไม่ค่อยมีความหลากหลายและมีปริมาณการสั่งซื้อไม่มาก และขายภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้มีระยะเวลาในการตอบสนองคำสั่งซื้อที่รวดเร็ว แต่มีอำนาจต่อรองต่ำ บริษัทขนาดกลางมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลจุดสั่งซื้อ และร่วมกันตัดสินใจเกี่ยวกับระดับสินค้าคงคลังค่อนข้างต่ำ เนื่องจากส่วนใหญ่มีรูปแบบการผลิตตามคำสั่งซื้อของลูกค้า

Table 6 Cooperations between manufacturers and customers based on size

Cooperation	Practice	Alliance	Small	Medium	Large
Information Sharing	Demand forecast	Local Customers	28.6a	83.3b	77.8b
	Point of sales	Local Customers	7.1a	66.7b	66.7b
	Selling price	Local Customers	21.4a	66.7b	66.7b
	Inventory levels	Local Customers	14.3a	50.0ab	66.7b
	Reorder point	Local Customers	14.3a	33.3ab	66.7b
	Customer order status	Local Customers	21.4a	50.0ab	77.8b
	Product shortage	Local Customers	28.6a	66.7ab	77.8b
	Customer order status	International Customers	22.2a	50.0ab	77.8b
Joint decision	Order quantity	Local Customers	7.1a	66.7b	55.6b
	Demand forecast	Local Customers	7.1a	66.7b	77.8b
	Wrong forecasts Solving	Local Customers	7.1a	66.7b	66.7b
	Product varieties planning	Local Customers	21.4a	83.3b	66.7b
	Selling price setting	Local Customers	7.1a	66.7b	55.6b
	Promotions establishment	Local Customers	14.3a	83.3b	55.6ab
	Inventory levels	Local Customers	0.0a	16.7ab	55.6b
	Inaccurate order correction	Local Customers	0.0a	50.0b	77.8b
	Inaccurate order correction	International Customers	11.1a	66.7b	77.8b

Numbers followed by different letter are significantly different ($p \leq 0.05$)

สรุป

บริษัทผู้ผลิตอาหารฮาลาลส่วนใหญ่จะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลและตัดสินใจร่วมกับลูกค้ามากกว่าผู้ส่งมอบ บริษัทผลิตสินค้าอาหารที่มีเนื้อสัตว์เป็นส่วนประกอบมีสมรรถนะที่ดีกว่าทั้งในเรื่องของความสมบูรณ์ในการส่งมอบ ความคล่องตัวของโซ่อุปทานและการตอบสนองโซ่อุปทาน เมื่อเปรียบเทียบกับบริษัทที่ผลิตสินค้าอาหารที่ปราศจากเนื้อสัตว์ เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลและร่วมกันตัดสินใจกับผู้ส่งมอบวัตถุดิบและลูกค้ามากกว่า บริษัทที่ผลิตอาหารที่ปราศจากเนื้อสัตว์ควรเพิ่มการร่วมกันตัดสินใจในรายละเอียดและความหลากหลายของสินค้ากับผู้ส่งมอบวัตถุดิบรอง บริษัทขนาดใหญ่มีความสมบูรณ์ในการส่งมอบสินค้าสูงที่สุด เนื่องจากมีกำลังการผลิตและมีอำนาจต่อรองกับผู้ส่งมอบค่อนข้างสูง และมีความร่วมมือกับผู้ส่งมอบและลูกค้าในระดับสูง บริษัทขนาดเล็กและขนาดกลางควรกระตุ้นการแลกเปลี่ยนข้อมูล ณ จุดขาย การร่วมกันพยากรณ์ความต้องการของลูกค้า การร่วมกันจัดโปรโมชั่นและร่วมกันแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับคำสั่งซื้อที่ผิดพลาดกับผู้ส่งมอบวัตถุดิบ การแลกเปลี่ยนข้อมูลจุดสั่งซื้อ และร่วมกันตัดสินใจเกี่ยวกับระดับสินค้าคงคลังกับลูกค้าภายในประเทศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กฎกระทรวงอุตสาหกรรม. 2545. **กำหนดจำนวนการจ้างงานและมูลค่าสินทรัพย์ถาวรของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม**. กฎกระทรวงประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 119 ตอนที่ 93 ก, หน้า 18.

ฐานข้อมูลสนับสนุนเพื่อการพัฒนาฮาลาลไทย สถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม. 2556. **สถานการณ์ฮาลาลโลก**. แหล่งที่มา: http: // thehalalfood.info/TH/industry.php, 29 มกราคม 2556.

พรธิภา องค์คุณารักษ์. 2554. **การจัดการโซ่อุปทานเชิงกลยุทธ์ในอุตสาหกรรมเกษตร**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานโลจิสติกส์ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2556. **คู่มือการประเมินประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์เกณฑ์ตัวชี้วัดมาตรฐานสำหรับผู้ประกอบการ**. บริษัท เอ็มดิก โฮลดิ้ง จำกัด, กรุงเทพฯ.

Ann Vereecke and Steve Muylle. 2006. Performance improvement through supply chain collaboration in Europe. **International Journal of Operations & Production Management**. Vol. 26, No. 11: 1176-1198.

Beata Slusarczyk and Sebastian Kot. Principles of The Supply Chain Performance Measurement. **Advanced Logistic Systems**. Vol. 6, No. 1: 17-24.

Economic Intelligence Center. 2015. **ตลาดเสื้อผ้ามุสลิมอาเซียน**. Source: https: // www.scbeic.com/th/detail/product/1364, 6 July 2015.

Harlina Suzana Jaafar. 2011. Halal Supply Chain in the Food Industry – A Conceptual Model. **IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA)**.

Supply Chain Council. 2008. **Supply Chain Operations Reference Model Version 9.0**. United States of America.

การพยากรณ์ราคาผักเมืองหนาว ณ ตลาดสี่มุมเมือง

Price Forecasting of Temperate Vegetable on Si Mum Muang Market

พูนสิริ ยิ้มหนองโพ[1*] และ ปรารถนา ปรารถนาดี[1]

Poonsiri Yimnongpo[1*] and Parthana Parthanadee[1]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิควิเคราะห์อนุกรมเวลาที่เหมาะสมสำหรับพยากรณ์ราคาขายของผักเมืองหนาว ณ ตลาดสี่มุมเมือง ด้วยข้อมูลอนุกรมเวลา ทั้งแบบรายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือน เพื่อให้เกษตรกรนำผลการพยากรณ์ไปใช้ประกอบการวางแผนการผลิตและเก็บเกี่ยวให้เหมาะสมกับผักแต่ละชนิด จากการศึกษาพบว่า การพยากรณ์ราคาผักโดยใช้ข้อมูลแบบรายวันมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ต่ำที่สุด เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ราคาขายมะนาวเหลือง พริกหวานสีเหลือง พริกหวานสีแดง เบบี้แครอท พริกหวานสีเขียว ถั่วหวาน และคะน้าฮ่องกง คือ วิธี Single Moving Average โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน MAPE เท่ากับ 1.52%, 1.84%, 1.93%, 1.47%, 1.67%, 4.22%, 3.08% ตามลำดับ ขณะที่แบบจำลองการพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับราคาขายกะหล่ำดอกม่วง และเรดโอ้คลีฟ คือ SARIMA (2,1,2)(1,0,1) และ SARIMA (1,1,0)(0,0,1) โดยมีค่า MAPE เท่ากับ 2.09%และ 1.63% ตามลำดับ สำหรับราคาขายพาร์สเลย์ เทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสมคือ Double Exponential Smoothing โดยมีค่า MAPE เท่ากับ 4.12% แบบจำลองพยากรณ์มีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่นำไปใช้ในการวางแผนขั้นต่อไป

ABSTRACT

The objective of this study is to find appropriate time series analysis techniques for forecasting selling prices of temperate vegetables at Si Mum Muang market, using daily, weekly and monthly data. The growers can use these forecast prices to plan for growing and harvesting each vegetable appropriately. From the study, forecasting by using daily time series data is most appropriate as it gave the lowest forecasting errors. The most suitable price forecasting technique for lemons, yellow sweet peppers, red sweet peppers, baby carrots, green sweet peppers, sugar snap peas and Chinese kales is Single Moving Average method, with MAPEs of 1.52%, 1.84%, 1.93%, 1.47%, 1.67%, 4.22% and 3.08% respectively. The most suitable price forecasting models for purple cauliflowers and red oak leaves are SARIMA (2,1,2)(1,0,1) and SARIMA (1,1,0)(0,0,1), with MAPEs of 2.09% and 1.63% respectively. For parsley prices, the most suitable technique is Double Exponential Smoothing method with MAPE of 4.12%. The forecasting models are reliable for the uses in further planning process.

Key Words: Forecasting; Time-series analysis; Temperate vegetables; Price

* Corresponding author; e-mail address: **pearhp@hotmail.com**

[1] ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ผักเมืองหนาว นิยมปลูกมากทางภาคเหนือของไทยเนื่องจากเป็นพื้นที่สูง ภูมิอากาศหนาวเย็นซึ่งเหมาะสมแก่การเพาะปลูกผักเมืองหนาวตลอดทั้งปี ทำให้เกษตรกรสามารถปลูกได้อย่างต่อเนื่องและหลากหลาย โดยผลัดเปลี่ยนชนิดผักไปตามสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ผักเมืองหนาวหลายชนิดได้รับความนิยมในการนำมารับประทาน เช่น ผักสลัด กะหล่ำปลี คะน้า แครอท แตงกวา ผักกาดขาว ผักกาดหอมห่อ กวางตุ้ง พริกหวาน มะเขือเทศ มันฝรั่ง เป็นต้น รวมถึงกระแสความนิยมใส่ใจดูแลสุขภาพร่างกายของผู้บริโภคในปัจจุบัน ทำให้มีความต้องการในการบริโภคผักสูง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกในอนาคต โดยสังเกตได้จากรายงานข้อมูลสถิติมูลค่าการนำเข้าและส่งออกผักและผลิตภัณฑ์ในปี พ.ศ. 2553-2557 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) ปัจจุบัน เกษตรกรส่วนใหญ่มีการเพาะปลูกผักโดยอาศัยประสบการณ์เป็นหลัก โดยไม่ได้มีการพยากรณ์ราคาขายผลผลิตล่วงหน้า การพยากรณ์ราคาขายผลผลิตล่วงหน้าด้วยวิธีที่เหมาะสม จะทำให้เกษตรกรทราบว่า ราคาขายผลผลิตจะสูงขึ้นหรือลดลงในช่วงเวลาใด สามารถนำผลที่ได้ไปใช้ประกอบการวางแผนช่วงเวลาและปริมาณการเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวผลผลิตแต่ละชนิดตามความต้องการของตลาดได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้เกษตรกรสามารถสร้างกำไรเพิ่มขึ้นได้ ในการศึกษานี้ คณะวิจัยฯ สนใจเก็บรวบรวมข้อมูลราคาขายส่งผักเมืองหนาวจากฐานข้อมูลของตลาดสี่มุมเมือง เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบชุดข้อมูลอนุกรมเวลาและวิธีการพยากรณ์ราคาที่เหมาะสมให้แก่เกษตรกร ซึ่งตลาดสี่มุมเมืองเป็นตลาดกลางค้าส่งผัก-ผลไม้ขนาดใหญ่ที่เปิดโอกาสให้เกษตรกรได้พบปะกับผู้ซื้อโดยตรง และมีการรายงานข้อมูลราคาขายผลผลิตในตลาดรายวัน ทำให้เกษตรกรสามารถศึกษาข้อมูลแนวโน้มของราคาขายผลผลิตในช่วงที่ผ่านมา สามารถตั้งราคาขายและปรับราคาขายขึ้น-ลงได้ตามความเหมาะสม (ตลาดสี่มุมเมือง, ม.ป.ป.) โดยในการศึกษานี้ คณะวิจัยฯ จะพิจารณาเฉพาะผลผลิตผักที่มีการจำหน่ายสู่ตลาดอย่างต่อเนื่องเท่านั้น

การพยากรณ์ หมายถึง การทำนาย การคาดการณ์ การประมาณค่าในอนาคตโดยอาศัยข้อมูลหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีต เทคนิคการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาเป็นการพยากรณ์เชิงปริมาณวิธีหนึ่ง ที่ต้องอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์และสถิติมาสร้างรูปแบบหรือสมการพยากรณ์ เพื่อพยากรณ์ข้อมูลในอดีตที่อยู่ในรูปของตัวเลข โดยจำเป็นต้องมีปริมาณข้อมูลที่มากพอเพื่อให้ผลของการพยากรณ์มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ข้อมูลอนุกรมเวลา คือ ชุดข้อมูลที่เก็บรวบรวมตามลำดับเวลาอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลอาจมีความแปรปรวนเกิดขึ้นเป็นรูปแบบ เช่น แนวโน้ม ฤดูกาล วัฏจักร เป็นต้น (ศิริลักษณ์, 2543) เทคนิคการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาที่นิยม ได้แก่ วิธีแบบง่าย (Naïve or Period Method) การวิเคราะห์อนุกรมเวลาแบบแยกส่วน (Decomposition Methods) เทคนิคการปรับเรียบ (Smoothing Methods) การวิเคราะห์อนุกรมเวลาแบบบ๊อกซ์-เจนกินส์หรือ ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) การพยากรณ์แบบปรับได้ (Adaptive Forecasting Methods) (สมเกียรติ, 2548) ซึ่งการนำเทคนิคการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลามาใช้อาจจำแนกตามรูปแบบของอนุกรมเวลาได้ดังนี้ (1) แบบจำลองคงที่หรือรูปแบบแนวเรียบ เช่น Simple Moving Average (SMA), Weighted Moving Average (WMA) และ Simple Exponential Smoothing (SES); (2) แบบจำลองอนุกรมเวลาที่มีรูปแบบมีแนวโน้ม เช่น Double Moving Average (DMA) และ Double Exponential Smoothing (DES); (3) แบบจำลองอนุกรมเวลาที่มีรูปแบบมีฤดูกาล เช่น Seasonal Additive Smoothing (SAS) และ Seasonal Multiplicative Smoothing (SMS); และ (4) แบบจำลองอนุกรมเวลาที่มีรูปแบบมีแนวโน้มและฤดูกาล

เช่น Holt-Winter's Additive Seasonal Smoothing และ Holt-Winter's Multiplicative Seasonal Smoothing ดังนั้นในการพยากรณ์ควรเลือกวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมต่อลักษณะของข้อมูล การพยากรณ์แบบอนุกรมเวลานั้นมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่รองรับการใช้งานอยู่เป็นจำนวนมาก โปรแกรมสำเร็จรูป Oracle Crystal Ball Predictor เป็นโปรแกรมหนึ่งที่สามารถพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยเปรียบเทียบการใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาที่นิยมโดยทั่วไป ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Method) วิธีการปรับเรียบ (Smoothing Method) ต่างๆ และ ARIMA

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เก็บรวบรวมข้อมูลราคาขายผักเมืองหนาว จากฐานข้อมูลของตลาดสี่มุมเมือง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 รวมระยะเวลา 5 ปี จากข้อมูลราคาขายผักเมืองหนาว จำนวน 71 ชนิด พบว่ามีผักเมืองหนาวเพียง 45 ชนิดที่มีข้อมูลเพียงพอสำหรับใช้ในการศึกษาวิจัย

2. คัดเลือกผักเมืองหนาว จำนวน 10 ชนิดที่มีราคาขายสูงสุด (ในหน่วยบาทต่อกิโลกรัม) ซึ่งได้แก่ มะนาวเหลือง (เลมอน) พริกหวานสีเหลือง พริกหวานสีแดง เบบี้แครอท คาราจีโอ้ (กะหล่ำดอกม่วง) เรดโอ้คลีฟ ถั่วหวาน (ซูก้าสแน็พพี) พริกหวานสีเขียว คะน้าฮ่องกง และพาร์สเลย์ ตามลำดับ

3. นำข้อมูลราคาขายผักเมืองหนาวรายวัน จากฐานข้อมูลของตลาดสี่มุมเมือง มาจัดให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลรายสัปดาห์ และรายเดือน

4. พยากรณ์ราคาขายผักเมืองหนาว 10 ชนิด โดยใช้อนุกรมเวลาในรูปแบบของข้อมูลรายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือน ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Oracle Crystal Ball Predictor โดยเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ในรูปของ ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation, MAD) ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) และค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percentage Error, MAPE)

5. สรุปผลการเปรียบเทียบชุดข้อมูลอนุกรมเวลาที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการพยากรณ์ และวิธีการพยากรณ์ราคาผักที่เหมาะสม

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการวิเคราะห์ข้อมูลและการพยากรณ์ราคาขายผักเมืองหนาวที่มีราคาขายสูงสุดทั้ง 10 ชนิด โดยใช้ข้อมูลราคาขายตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 ทั้งในรูปของข้อมูลรายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือน โดยเลือกวิธีที่ให้ค่า MAPE (Mean Absolute Percentage Error) ที่มีค่าต่ำที่สุดเป็นหลัก เนื่องจากค่า MAPE สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์อนุกรมเวลาที่ต่างชุดกันได้ พบว่า การพยากรณ์ราคาขายผักเมืองหนาวทั้ง 10 ชนิด ในรูปของข้อมูลรายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือน ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่รายงานโดยโปรแกรมสำเร็จรูป Oracle Crystal Ball Predictor ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ (Table 1) โดยการใช้ข้อมูลแบบรายวันในการพยากรณ์ราคาจะมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาถึงวิธีการพยากรณ์ด้วยเทคนิคอนุกรมเวลา โดยใช้ข้อมูลรายวัน (Table 2) พบว่า วิธี Single Moving Average อันดับ 1 หรือวิธีแบบง่าย (Naïve Method) เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ราคาขายผลผลิตแบบรายวันของผัก 7 ชนิด ได้แก่

มะนาวเหลือง พริกหวานสีเหลือง พริกหวานสีแดง เบบี้แครอท ถั่วหวาน พริกหวานสีเขียว และคะน้าฮ่องกง วิธี SARIMA (Seasonal ARIMA) เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ราคาขายผลผลิตแบบรายวันของผัก 2 ชนิด ได้แก่ กะหล่ำดอกม่วง และเรดโอ้คลีฟ ส่วนวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ราคาขายผลผลิตแบบรายวันของพาร์สเลย์ คือ Double Exponential Smoothing โดยทุกวิธีมีค่า Theil's U เท่ากับ 1 หรือน้อยกว่า 1 แสดงว่า วิธีการพยากรณ์ที่ใช้ให้ผลเท่ากับ หรือดีกว่าการใช้วิธีแบบง่าย ตามลำดับ นอกจากนี้ ทุกวิธีมีค่า Durbin-Watson ใกล้เคียง 2 แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ไม่มีสหสัมพันธ์ในตัวเอง (No autocorrelation) (Oracle Corporation, 2007)

Table 1 Forecasting error report of temperate vegetable prices at the Si Mum Muang Market

	Temperate vegetable	Average Price	Month			Week			Day		
			RMSE	MAD	MAPE	RMSE	MAD	MAPE	RMSE	MAD	MAPE
1.	Lemons	98.40	10.71	6.93	6.14%	5.15	3.62	3.81%	3.56	1.33	1.52%
2.	Purple Cauliflowers	96.31	14.28	10.23	10.85%	7.72	5.12	5.87%	4.00	1.46	2.09%
3.	Yellow Sweet Peppers	93.59	10.75	8.51	9.31%	6.11	4.45	4.87%	4.64	1.69	1.84%
4.	Red Sweet Peppers	92.99	10.90	8.87	9.91%	6.21	4.56	5.08%	4.63	1.74	1.93%
5.	Baby Carrots	91.59	9.30	7.03	7.89%	6.69	4.02	4.82%	3.28	1.08	1.47%
6.	Red Oak Leaf Lettuces	88.99	5.45	3.95	4.36%	3.83	2.21	2.47%	2.90	1.00	1.63%
7.	Green Sweet Peppers	86.89	10.63	8.00	10.28%	4.43	3.20	4.16%	3.52	1.30	1.67%
8.	Sugar Snap Peas	86.59	10.80	8.28	8.89%	8.21	6.09	7.08%	6.19	2.94	4.22%
9.	Parsleys	77.94	14.76	9.67	11.83%	7.32	4.60	5.68%	4.89	1.87	4.12%
10.	Chinese Kales	76.76	9.88	7.86	11.08%	6.81	4.73	6.21%	5.57	2.52	3.08%

Table 2 Best forecasting methods for of temperate vegetable prices at the Si Mum Muang Market

	Temperate vegetable	Best Method	Parameter	Value	Theil's U	Durbin-Watson
1.	Lemons	Single Moving Average	Order	1	1.00	1.91
2.	Purple Cauliflowers	SARIMA(2,1,2)(1,0,1)	-	-	0.9744	1.99
3.	Yellow Sweet Peppers	Single Moving Average	Order	1	1.00	1.68
4.	Red Sweet Peppers	Single Moving Average	Order	1	1.00	1.82
5.	Baby Carrots	Single Moving Average	Order	1	1.00	1.65
6.	Red Oak Leaf Lettuces	SARIMA(1,1,0)(0,0,1)	-	-	0.8473	2.00
7.	Green Sweet Peppers	Single Moving Average	Order	1	1.00	2.02
8.	Sugar Snap Peas	Single Moving Average	Order	1	1.00	2.18
9.	Parsleys	Double Exponential Smoothing	Alpha	0.953	0.0478	2.07
			Beta	0.238		
10.	Chinese Kales	Single Moving Average	Order	1	1.00	1.96

Figures 1-10 แสดงการเปรียบเทียบราคาขายจริงและพยากรณ์ รวมถึงราคาขายพยากรณ์ล่วงหน้า 365 วันของผักเมืองหนาวทั้ง 10 ชนิด สมการพยากรณ์ราคาขายรายวันของผักทั้ง 10 ชนิด แสดงได้ดังนี้

1. เทคนิคการพยากรณ์ Single Moving Average อันดับ 1 หรือวิธีแบบง่าย (Naïve Method) มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ราคาขายผัก 7 ชนิด ได้แก่ มะนาวเหลือง พริกหวานสีเหลือง พริกหวานสีแดง เบบี้แครอท ถั่วหวาน พริกหวานสีเขียว และคะน้าฮ่องกง ซึ่งเทคนิคการพยากรณ์นี้มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลที่มีรูปแบบคงที่ ไม่มีองค์ประกอบของแนวโน้มและฤดูกาลเกี่ยวข้อง ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\hat{Y}_{t+1}=Y_t \quad (1)$$

โดย Y_t = ค่าข้อมูลจริง ณ เวลา t

$\hat{Y}_{t+1}$ = ค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t+1$

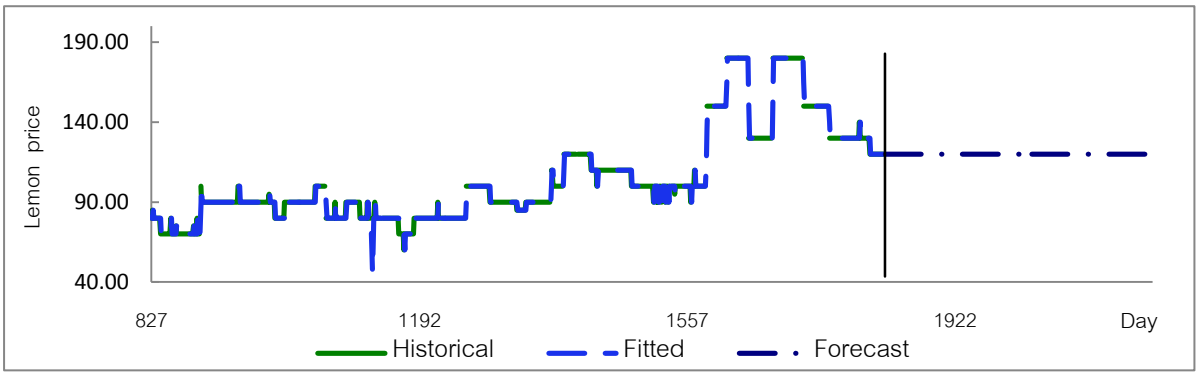


Figure 1 Actual versus forecast selling prices of lemon from single moving average method

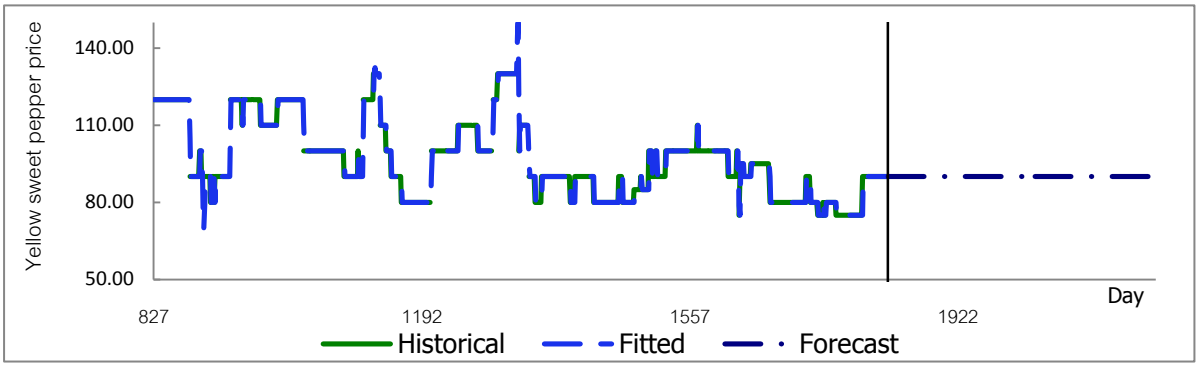


Figure 2 Actual versus forecast selling prices of yellow sweet pepper from single moving average method

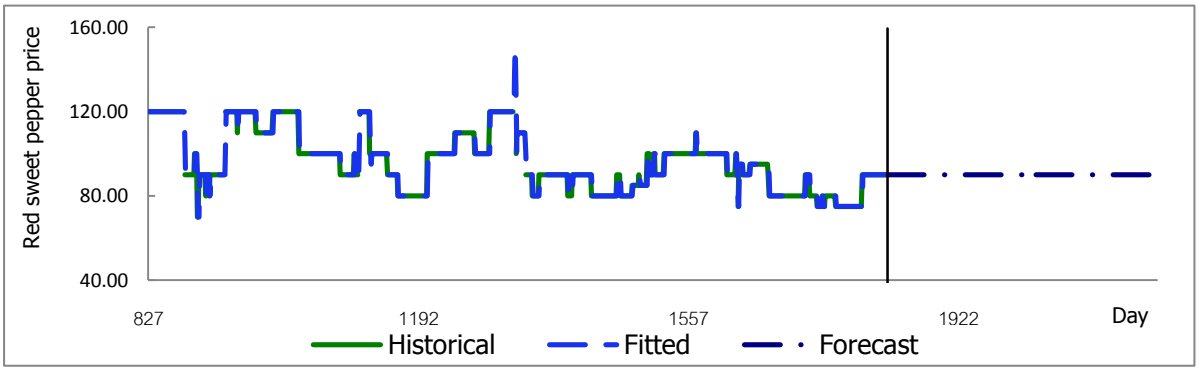


Figure 3 Actual versus forecast selling prices of red sweet pepper from single moving average method

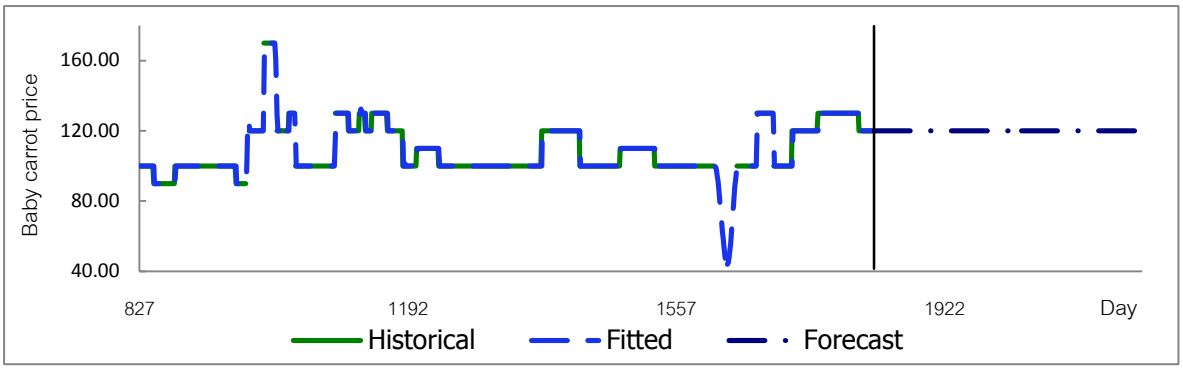


Figure 4 Actual versus forecast selling prices of baby carrot from single moving average method

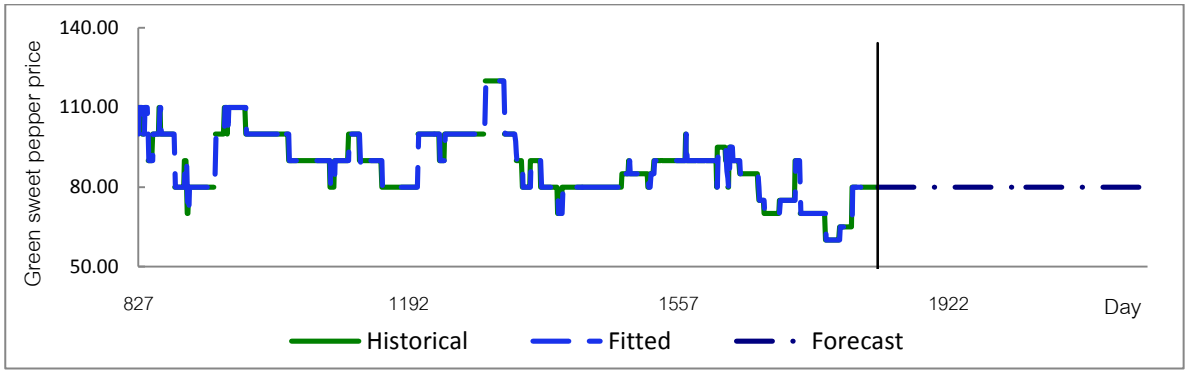


Figure 5 Actual versus forecast selling prices of green sweet pepper from single moving average method

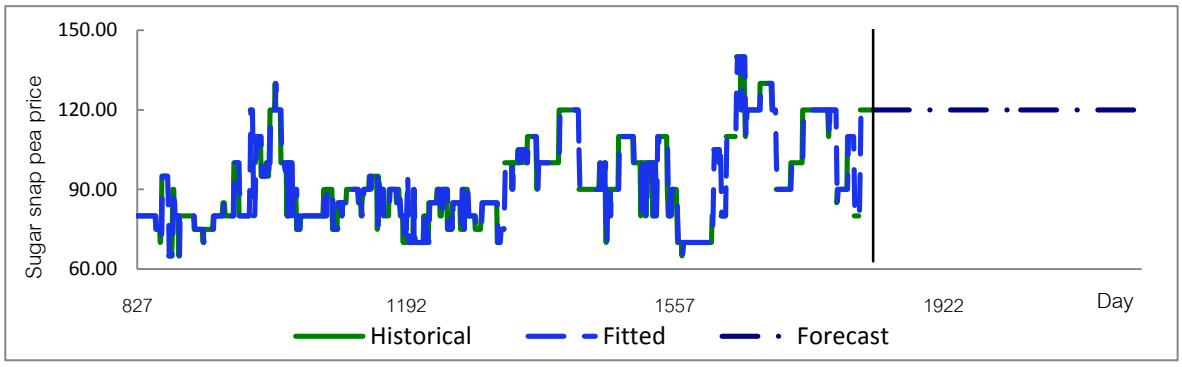


Figure 6 Actual versus forecast selling prices of sugar snap pea from single moving average method

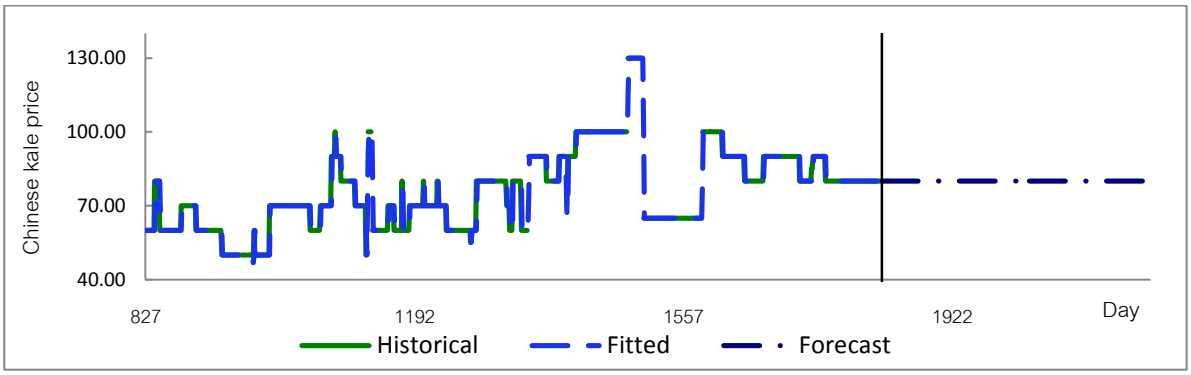


Figure 7 Actual versus forecast selling prices of Chinese kale from single moving average method

2. เทคนิคการพยากรณ์ SARIMA มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ราคาขายกะหล่ำดอกม่วงและเรดโอ้คลีฟ ซึ่ง SARIMA เป็นแบบจำลองอนุกรมเวลาที่ซับซ้อน มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลทั้งที่มีและไม่มีค่าองค์ประกอบแนวโน้มและองค์ประกอบฤดูกาลเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยแบบจำลองราคาขายกะหล่ำดอกม่วงที่เหมาะสม คือ SARIMA (2,1,2)(1,0,1) โดยที่ AR(1) $\phi_1 = 0.1442$, AR(2) $\phi_2 = -0.4650$, MA(1) $\phi_2 = -0.1350$, MA(2) $\phi_2 = -0.3976$, Seasonal AR(1) $\Phi_1 = 0.1831$ และ Seasonal MA(1) $\Theta_1 = 0.2124$ แบบจำลองราคาขายเรดโอ้คลีฟที่เหมาะสม คือ SARIMA (1,1,0)(0,0,1) โดยที่ AR(1) $\phi_1 = 0.3514$ และ Seasonal MA(1) $\Theta_1 = -0.0142$ ดังแสดงในสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

กะหล่ำดอกม่วง:

$$(1 - 0.1442B + 0.4650B^2)(1 - 0.1831B^{365})(1 - B)Y_t = (1 + 0.1350B + 0.3976B^2)(1 - 0.2124B^{365})\varepsilon_t \quad (2)$$

เรดโอ้คลีฟ:

$$(1 - 0.3514B)(1 - B)Y_t = (1 + 0.0142B^{365})\varepsilon_t$$

$$Y_t = 1.3514Y_{t-1} - 0.3514Y_{t-2} + \varepsilon_t + 0.0142\varepsilon_{t-365} \quad (3)$$

โดย Y_t = ค่าข้อมูลจริง ณ เวลา t

ε_t = ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม ณ เวลา t

B = backshift operator โดยที่ $BY_t = Y_{t-1}, B^2Y_t = Y_{t-2}, B^{365}Y_t = Y_{t-365}$

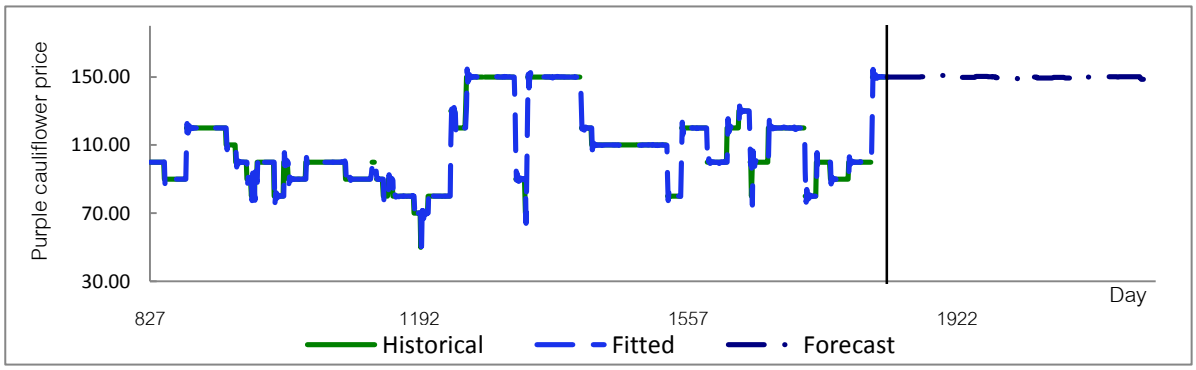


Figure 8 Actual versus forecast selling prices of purple cauliflower from SARIMA (2,1,2)(1,0,1) model

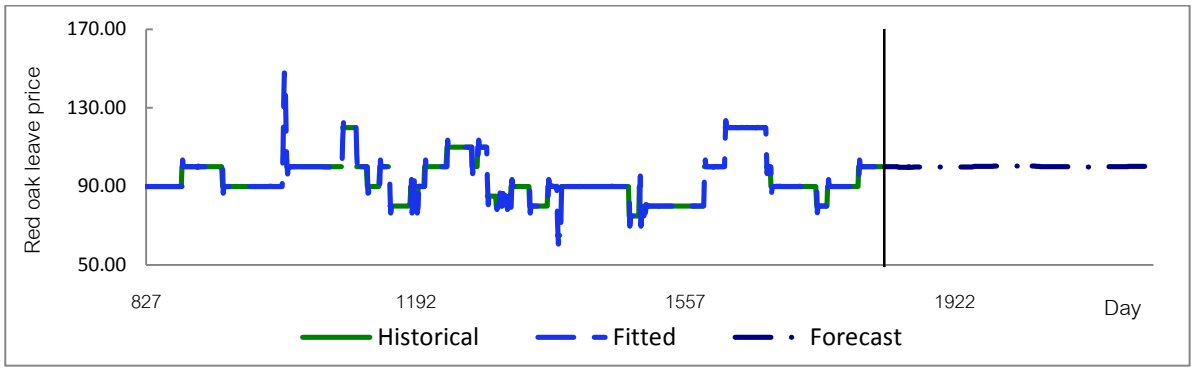


Figure 9 Actual versus forecast selling prices of red oak leaf from SARIMA (1,1,0)(0,0,1)model

3. เทคนิคการพยากรณ์ Double exponential smoothing มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ราคาขายส่งพาร์สเลย์รายวัน ซึ่งเทคนิคนี้มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลที่มีค่าองค์ประกอบแนวโน้ม แต่ไม่มีองค์ประกอบฤดูกาลเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\text{(Level)} \quad L_t = 0.953Y_t + 0.047(L_{t-1} + T_{t-1})$$

$$\text{(Trend)} \quad T_t = 0.238(L_t - L_{t-1}) + 0.762T_{t-1} \qquad (4)$$

$$\text{(Forecasting)} \quad \hat{Y}_{t+n} = L_t + nT_t$$

โดย $\hat{Y}_{t+n}$ = ค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t+n$

Y_t = ค่าข้อมูลจริง ณ เวลา t

L_t = ค่าประมาณของฐานระดับของอนุกรมเวลา ณ เวลา t

T_t = ค่าประมาณขององค์ประกอบแนวโน้ม ณ เวลา t

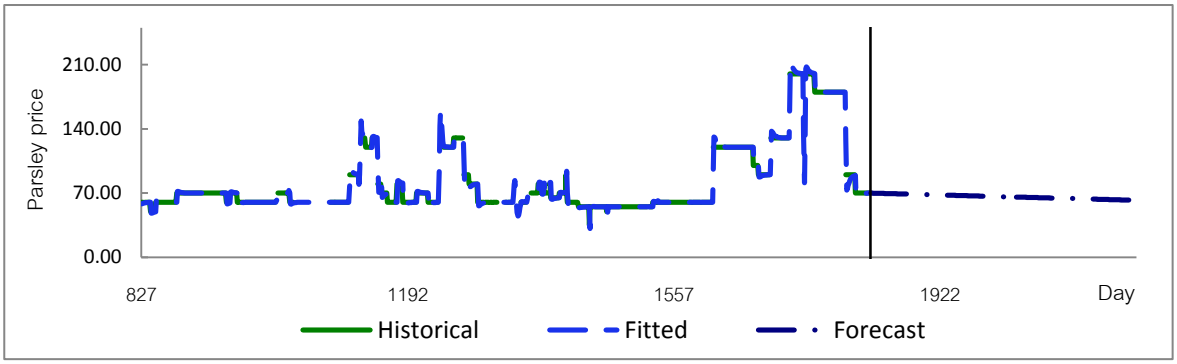


Figure 10 Actual versus forecast selling prices of parsley from Double Exponential Smoothing model

สรุป

จากการวิเคราะห์การพยากรณ์ราคาขายผักเมืองหนาว ณ ตลาดสี่มุมเมือง จำนวน 10 ชนิดที่มีราคาขายเฉลี่ยสูงสุด พบว่า การพยากรณ์โดยใช้ชุดข้อมูลราคาขายรายวันในการพยากรณ์ผักเมืองหนาวทั้ง 10 ชนิดมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการพยากรณ์ด้วยชุดข้อมูลรายสัปดาห์และรายเดือน เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ราคาขายมะนาวเหลือง พริกหวานสี

เหลือง พริกหวานสีแดง เบบี้แครอท พริกหวานสีเขียว ถั่วหวาน และคะน้าฮ่องกง คือ วิธี Single Moving Average โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ MAPE เท่ากับ 1.52%, 1.84%, 1.93%, 1.47%, 1.67%, 4.22%, 3.08% ตามลำดับ ขณะที่เทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับราคาขายกะหล่ำดอกม่วงและเรดโอ้คลีฟ คือ SARIMA โดยแบบจำลองพยากรณ์ราคาขายกะหล่ำดอกม่วงที่เหมาะสม คือ SARIMA (2,1,2)(1,0,1) ให้ค่า MAPE เท่ากับ 2.09% และแบบจำลองพยากรณ์ราคาขายเรดโอ้คลีฟที่เหมาะสม คือ SARIMA (1,1,0)(0,0,1) ให้ค่า MAPE เท่ากับ 1.63% สำหรับราคาขายพาร์สเลย์ เทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสม คือ Double Exponential Smoothing โดยมีค่า MAPE เท่ากับ 4.12% แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้เพื่อการวางแผนการผลิตและเก็บเกี่ยวผักเมืองหนาวแต่ละชนิดตามความเหมาะสมต่อไป โดยเกษตรกรสามารถพิจารณาช่วงเวลาที่ราคาผลผลิตสูงและนำไปวางแผนเริ่มต้นการเพาะปลูกให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ทันในช่วงเวลาดังกล่าว หรือเกษตรกรอาจพิจารณาการวางแผนการปลูกผักที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดด้านทรัพยากร ดังเช่นตัวอย่างานวิจัยของพฤทธ์สรรค์ (2555) และชญาพร (5558) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

ชญาพร พรสุขประเสริฐ. 2558. การศึกษาการวางแผนการปลูกพืชที่เหมาะสมในเขตอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา. การศึกษาค้นคว้าอิสระปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ตลาดสี่มุมเมือง. ม.ป.ป. **ความเป็นมา**. แหล่งที่มา: http://www.taladsimummuang.com/dmma/Portals/About.aspx, 16 มิถุนายน 2558.

ตลาดสี่มุมเมือง. 2558. **ราคาผักเมืองหนาว**. แหล่งที่มา: http://www.taladsimummuang.com/dmma/Portals/PriceList.aspx?id=01, 17 พฤษภาคม 2558.

พฤทธ์สรรค์ สุทธิไชยเมธี. 2555. การประยุกต์ใช้ Linear Programming สำหรับการวางแผนการผลิตทางการเกษตรและติดตามผลการดำเนินงาน ตามหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง. วารสารสุทธิปริทัศน์. 26 (68):19-36.

ศิริลักษณ์ สุวรรณวงศ์. 2543. **เทคนิคการพยากรณ์การวิเคราะห์อนุกรมเวลา**. ม.ป.พ., กรุงเทพฯ.

สมเกียรติ เกตุเอี่ยม. 2548. **เทคนิคการพยากรณ์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ, พังลุง.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2558. **สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศปี 2557**. เอกสารสถิติการเกษตรเลขที่ 403. กรุงเทพฯ.

Oracle Corporation. 2007. **CB Predictor User Manual, Version 1.6**. Oracle Corporation. California.

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร

Subject: Agro-Industry

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

การปรับปรุงการต้านน้ำของกระดาษสาโดยกลูโคแมนแนน

Water resistance improvement of Saa paper by glucomannan

วุฒินันท์ คงทัด[1*] สุธีรา วิทยากาญจน์[1] และ รัตนา ตันฑเทอดธรรม[1]

Wuttinant Kongtud[1*], Suteera Witayakran[1] and Rattana Tantatherdtam[1]

บทคัดย่อ

การพัฒนากระดาษสาให้ทนน้ำ มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้กระดาษสาสามารถแช่น้ำได้นานเมื่อกระดาษแห้งแล้วมีสมบัติเชิงกล ความแข็งแรงเหมือนเดิม การทดลองเคลือบกระดาษสาที่น้ำหนักมาตรฐาน 105±5 g/m^2 ด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้น 0.5% โดยปริมาตร แช่ในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ pH 9 11 และ 13 เวลา 20 นาที แล้วนำไปทดสอบแช่น้ำสะอาดที่เวลา 2 4 6 8 และ 10 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าการแช่กระดาษที่ pH 11 ทำให้กระดาษสาที่ได้สามารถแช่น้ำสะอาดได้ถึง 8 ชั่วโมง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษสาตามมาตรฐาน TAPPI ประกอบด้วย ความต้านแรงหักพับ ความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด ความต้านแรงดันทะลุ และความเรียบเฉลี่ย 1494, 32.01 N.m/g, 62.07 mN.m^2/g, 3.96 kPa.m^2/g และ 2.12 วินาที ตามลำดับ กระดาษสามารถใช้ทำผลิตภัณฑ์หัตถกรรมได้เหมือนเดิม

ABSTRACT

This research study was conducted to improve water resistance of Saa paper to prolong water soaking time of Saa paper and maintain mechanical properties of Saa paper after drying. In this study, Saa paper at basis weight of 105±5 g/m^2 was coated with 0.5%v/v Glucomannan solution, and then soaked in calcium carbonate solution for 20 mins at different pH: 9, 11, and 13. Then, the obtained paper was soaked in water for 2, 4, 6, 8, and 10 hours. The results show that Saa paper soaked at pH 11 can stay in water up to 8 hours. Mechanical properties of this paper were tested according to TAPPI Standards. Folding endurance, tensile index, tear index, burst index, and smoothness of the paper were 1494, 32.01 N.m/g, 62.07 mN.m^2/g, 3.96 kPa.m^2/g and 2.12 s, respectively. The paper can still be used to make handicraft products.

Key Words: Saa paper, glucomannan, handicraft paper

* Corresponding author; e-mail address: **aapwnk@ku.ac.th**

[1]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

กระดาษสาเป็นกระดาษหัตถกรรมที่มีการผลิตกันมาตั้งแต่สมัยโบราณจนถึงปัจจุบัน สร้างรายได้ให้กับประเทศเป็นจำนวนมาก (อำนาจ และคณะ, 2545) เนื่องจากต้นปอสา *(Broussonetia papyrifera (L.)* Vent.*)* เป็นพืชที่เปลือกมีเส้นใยยาวเฉลี่ย 7.3 มิลลิเมตร มีความขาว อ่อนนุ่มเหนียวมากเหมาะที่จะใช้ทำกระดาษหัตถกรรม Amada. (1988) ดังนั้นจึงได้มีการนำเส้นใยปอสามาผลิตกระดาษทั้งแบบญี่ปุ่น (Japanese handmade paper) การผลิตกระดาษสาแบบญี่ปุ่นนี้ยังแบ่งวิธีการทำแผ่นเป็น 2 แบบคือ Nagashizuki และ Tamezuki Ohkawa. (1991) และการผลิตกระดาษสาแบบไทยซึ่งมีหลายประเทศที่มีวิธีการผลิตเหมือนกับประเทศไทย คุณภาพของกระดาษสาจะเป็นตัวบอกว่ากระดาษสาที่ผลิตได้มีคุณภาพดีหรือไม่จะมีการทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด ความต้านทานแรงหักพับ และความต้านทานแรงดันทะลุ สมบัติด้านทัศนะศาสตร์ของกระดาษเช่น ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความวาว และสมบัติทางประสาทสัมผัส เช่น ความนุ่ม เสียงที่เกิดจากการขยับกระดาษ ความเปราะ ความแตกต่างระหว่างผิวด้านบน และด้านล่างของกระดาษ ลักษณะพื้นผิว การดูดซับ และความไม่สม่ำเสมอของเนื้อกระดาษ (โยชินาริ ,2543) คุณภาพของกระดาษที่ชาวบ้านผลิตจะมีคุณภาพไม่ดี ไม่มีความเหนียว เปื่อย ขาดง่าย ไม่มีความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษ เนื่องจากการขาดความรู้การผลิตและการใช้สารปรับปรุงคุณภาพของกระดาษ (บังอร และยุพา, 2532; เพิ่มศักดิ์ และคณะ, 2538) ปัจจุบันได้มีการแนะนำให้ใช้สารกลูโคแมนแนนเคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษสา โดยผู้เชี่ยวชาญของญี่ปุ่น Fujimori. (2545) กระดาษจะมีความแข็งแรงในสภาวะที่แห้ง แต่ในสภาวะเปียกน้ำกระดาษจะไม่แข็งแรง เปื่อย ขาดง่าย และเกิดเชื้อราจากการเคลือบด้วยสารกลูโคแมนแนน อีกด้วยเนื่องจากกลูโคแมนแนนเป็นสารประกอบในหัวบุกที่เกิดจากการรวมตัวกันของน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลแมนโนสในอัตราส่วน 1:2 (Scientificpysphic, 2004; Glocomannan, 2002)

จากการศึกษาข้อมูลพบว่ากลูโคแมนแนนมีคุณสมบัติพิเศษในการเกิดเจล สามารถเป็นเจลที่คืนรูปได้และคืนรูปไม่ได้ในสภาวะที่ผ่านการแช่ในสารละลายด่าง ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ทำการศึกษาทดลองโดยได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผลการทดลองพบว่าถ้าปรับสภาพเจลกลูโคแมนแนนที่เคลือบกระดาษสา โดยแช่ในสารละลายด่าง เจลที่เคลือบกระดาษนั้นจะเปลี่ยนสภาพเป็นเจลที่ไม่ละลายน้ำทำให้กระดาษสามารถแช่น้ำอยู่ได้นานโดยไม่ขาด ดังนั้นถ้านำผลงานวิจัยนี้ เผยแพร่ให้เกษตรกรและกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่ผลิตกระดาษหัตถกรรมจะเกิดประโยชน์ต่อเกษตรกรและประเทศเป็นอย่างมาก

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเปลือกปอสาและสัณฐานวิทยาเส้นใยปอสาเกรด A

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเปลือกปอสาเกรด A ที่ใช้ทดลองประกอบด้วยโฮโลเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส เพนโตแซน สารแทรก ลิกนิน และเถ้า ตามวิธีของ Anonymous. (2002) และ Browning. (1967) วิเคราะห์สัณฐานวิทยาเส้นใย ประกอบด้วย ความยาว ความกว้าง ขนาดของลูเมน และความหนาของผนังเส้นใยตามวิธีของ Franklin. (1945)

การทดสอบความเข้มข้นสารละลายด่างโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ปรับสภาพเจลกลูโคแมนแนน

ทำแผ่นกระดาษด้วยมือแบบไทยน้ำหนักมาตรฐาน 105± g/m^2 โดยใช้เยื่อที่ผ่านการต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 8% และฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 4 % ตามวิธีของ (วิชัย และคณะ, 2545) เคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้น 0.5% โดยปริมาตร ด้วยแปรงตามวิธีของ Fujimori. (2545) วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely randomized design :CRD) มีตัวอย่างทดลอง 4 ตัวอย่าง ทดลองตัวอย่างละ 4 ซ้ำ คือ กระดาษสาที่แช่ในสารละลายด่างโซเดียมคาร์บอเนตที่ pH 9 11 และ 13 เป็นเวลา 20 นาที ล้างด้วยน้ำสะอาดเอาสารละลายด่างออกตามผลการทดลองของ (วุฒินันท์ และคณะ, 2558) นำตัวอย่างทดลองเปียกน้ำทดสอบความต้านทานแรงดึง ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T456 om-82 ด้วยเครื่อง Initial wet strength tester KRK serial No. 2005056 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) และตัวอย่างแห้งทดสอบสมบัติเชิงกลตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI โดยนำตัวอย่างปรับสภาวะตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T 402 om-93 ในห้องที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 50±2 % และอุณหภูมิ 23±1 องศาเซลเซียส ผึ่งตัวอย่างไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง จึงทำการทดสอบ ประกอบด้วย น้ำหนักมาตรฐานตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T410 om-88 ความต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่อง Schopper tensile tester KRK serial No. 9804071 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T404 om-92 ความต้านทานแรงฉีกขาดด้วยเครื่อง Tearing strength tester KRK serial No. 9812168 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T414 om-98 ความต้านทานการหักพับ ด้วยเครื่อง MIT folding endurance tester KRK serial No. 9804076 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T511 om-94 ความเรียบ ด้วยเครื่อง Bekk smoothness tester, Hp type KRK serial No. 9903020 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T476 om-91 ความต้านทานแรงดันทะลุ ด้วยเครื่อง Mullen bursting strength tester KRK serial No. 9804074 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T403 om-97 นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS เปรียบเทียบความแตกต่างของกระดาษ และตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple rang test: (DMRT) เพื่อคัดเลือกความเข้มข้นสารละลายด่างที่เหมาะสม

การทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษที่ผ่านการแช่น้ำแล้ว

ทำแผ่นกระดาษสาเพื่อใช้ทดสอบเหมือนที่กล่าวมาคือทำด้วยมือแบบไทยน้ำหนักมาตรฐาน 105±5 g/m^2 เคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้น 0.5% แช่ในสารละลายด่างโซเดียมคาร์บอเนตที่ pH 11 เวลา 20 นาที ล้างด้วยน้ำสะอาด ตากกระดาษให้แห้งทำการทดลองโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely randomized design :CRD) มีตัวอย่างทดลอง 6 ตัวอย่าง ทดลองตัวอย่างละ 4 ซ้ำ ตัวอย่างที่แช่ในน้ำสะอาด 0 2 4 6 8 และ 10 ชั่วโมง นำตัวอย่างทดลองที่เปียกน้ำทดสอบความต้านทานแรงดึงตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T456 om-82 ด้วยเครื่อง Initial wet strength tester KRK serial No. 2005056 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) และตัวอย่างที่แห้ง ทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI ประกอบด้วย น้ำหนักมาตรฐานตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T410 om-88 ความต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่อง Schopper tensile tester KRK serial No. 9804071 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธี

มาตรฐานของ TAPPI T404 om-92 ความต้านทานแรงฉีกขาดด้วยเครื่อง Tearing strength tester KRK serial No. 9812168 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T414 om-98 ความต้านทานการหักพับ ด้วยเครื่อง MIT folding endurance tester KRK serial No. 9804076 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T511 om-94 ความเรียบ ด้วยเครื่อง Bekk smoothness tester, Hp type KRK serial No. 9903020 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T476 om-91 ความต้านทานแรงดันทะลุ ด้วยเครื่อง Mullen bursting strength tester KRK serial No. 9804074 (Kumagai Riki Kogyo, CO., Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T403 om-97 นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS เปรียบเทียบความแตกต่างของกระดาษ และตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple rang test: (DMRT) เพื่อคัดเลือกเวลาแช่น้ำของกระดาษที่เหมาะสม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเปลือกและสัณฐานวิทยาเส้นใยปอสาเกรด A

เปลือกปอสาเกรด A ที่ใช้ศึกษาทดลองมีอายุ 1 ปี ลอกเปลือกสดโดยการนึ่งมีความยาวเฉลี่ย 1 เมตร เปลือกด้านหน้าสีขาวออกเขียว ด้านหลังสีน้ำตาลอ่อน มีจุดดำได้ 1-2 จุด ไม่มีแผล ไม่มีทราย เชื้อรา และฝุ่นผง แห้งสมบูรณ์มีเปลือกเกรด B ผสมได้ไม่เกิน 10% มัดบัลเดิ้ลละ 50 กิโลกรัม (ทะดะโอะ, 2542) องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยแอลฟาเซลลูโลส 63.92% โฮโลเซลลูโลส 77.03% ลิกนิน 2.85% และเถ้า 5.43% ใกล้เคียงของ (วิทยา, 2540) ที่ได้แอลฟาเซลลูโลส 71.03% โฮโลเซลลูโลส 77.55% ลิกนิน 7.64% และเถ้า 6.30% ใกล้เคียงของ (วิชัย และคณะ, 2545) ที่ได้แอลฟาเซลลูโลส 62.14% โฮโลเซลลูโลส 71.03% ลิกนิน 3.32% และเถ้า 4.30% เส้นใยปอสามีความยาวเฉลี่ย 8.9 มิลลิเมตร เส้นใยมีความกว้างเฉลี่ย 0.0289 มิลลิเมตร ความกว้างของลูเมนเฉลี่ย 0.0237 มิลลิเมตร ผนังเส้นใยมีความหนาเฉลี่ย 0.0051 มิลลิเมตร ใกล้เคียงของ (วิชัย และคณะ, 2545) ที่วัดความยาวของเส้นใยได้ 8.44 มิลลิเมตร ความกว้าง 0.0175 มิลลิเมตร ขนาดของลูเมนกว้าง 0.0051 มิลลิเมตร และความหนาของผนังเซลล์ 0.0062 มิลลิเมตร และใกล้เคียงของ (สุชาดา และคณะ, 2545) ศึกษาปอสาจำนวน 5 สายพันธุ์ เส้นใยยาวเฉลี่ย 8.7447 มิลลิเมตร กว้างเฉลี่ย 0.013 มิลลิเมตร ลูเมนกว้างเฉลี่ย 0.0050 มิลลิเมตร และผนังเซลล์หนาเฉลี่ย 0.0070 มิลลิเมตร ความสามารถในการสานตัวของเส้นใย (Runkel ratio) เส้นใยปอสามีค่า Runkel ratio 0.43 ซึ่งน้อยกว่า 1 แสดงว่าเส้นใยมีผนังเส้นใยที่บาง กระดาษที่ได้จะมีความเรียบ Casey (1980) ค่า Runkel ratio ที่วัดได้ต่างกับการศึกษาของ (วิชัย และคณะ, 2545) วัดได้ 2.46 และ (สุชาดา และคณะ, 2545) วัดได้ 2.90 ความสามารถต้านทานแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษ (Flexibility coefficient) ค่าที่วัดได้ของเส้นใยปอสาคือ 0.82 ซึ่งมากกว่า 0.5 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมแสดงว่าเยื่อปอสาที่นำไปผลิตกระดาษจะมีความต้านทานต่อแรงดึง แรงดันทะลุ และแรงหักพับสูง ค่าที่วัดได้นี้มากกว่าการศึกษาของ (วิชัย และคณะ, 2545) ที่วัดค่า Flexibility coefficient ได้ 0.29 ความสามารถต้านทานต่อแรงฉีกขาดของกระดาษ (Slenderness ratio) เส้นใยปอสาวัดค่าได้ 307.95 แสดงว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อปอสาจะมีความต้านทานต่อแรงฉีกขาดได้ดี ค่า Slenderness ratio ที่วัดได้จะน้อยกว่าการศึกษาของ (วิชัย และคณะ, 2545) ที่วัดได้ 483.65 และ (สุชาดา และคณะ, 2545) ที่วัดได้ 464.55 ความเหมาะสมของเส้นใยที่จะนำไปใช้ผลิตกระดาษ Wall fraction ค่าเส้นใย

ปอสาที่วัดได้ 82% ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ (วิชัย และคณะ, 2545) ที่วัดได้ 71.06% และ (สุชาดา และคณะ, 2545) ที่วัดได้ 73.78% สามารถใช้ผลิตกระดาษหัตถกรรมได้แต่อาจจะไม่เหมาะที่จะใช้ผลิตในอุตสาหกรรมเพราะเยื่อที่ดีที่จะใช้ผลิตในระบบอุตสาหกรรมควรจะมีค่า Wall fraction น้อยกว่า 40% Rydolm. (1967)

ผลการทดสอบความเข้มข้นสารละลายด่างโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้ปรับสภาพเจลกลูโคแมนแนน

การแช่กระดาษสาที่เคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้น 0.5% ในสารละลายด่างโซเดียมคาร์บอเนตที่ pH 9 11 และ 13 เวลา 20 นาที โดยใช้กระดาษสาที่เคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้น 0.5% แต่ไม่ผ่านการแช่ด่างเป็นตัวเปรียบเทียบผลปรากฏว่าน้ำหนักมาตรฐาน และความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ ส่วนความต้านทานแรงหักพับ ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด ความเรียบ ของกระดาษแห้งและความต้านทานแรงดึงของกระดาษเปียกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ จากข้อมูลกระดาษที่แช่สารละลายด่างที่ pH 11 กระดาษจะมีความต้านทานแรงหักพับและความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด ทั้งในกระดาษแห้งและกระดาษเปียก ดังนั้นควรแช่กระดาษสาที่เคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนที่ความเข้มข้น 0.5% ในสารละลายด่างโซเดียมคาร์บอเนตที่ pH 11 จะทำให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากกลูโคแมนแนนมีคุณสมบัติช่วยในการยึดติดได้ดี (Umemura et al., 2003; Tang et al., 2003; Chen et al., 2003) ถ้า pH มากกว่า 11 จะมีผลทำให้ความต้านทานแรงดึงของกระดาษเปียกลดลง การเตรียมสารทำได้ยากเนื่องจากเกิดการอิ่มตัว (Table1)

Table 1 Mechanical properties comparison of Saa paper coater with 5% glucomannan solution at different pH of alkaline soaking

Alkaline soaking (pH)	Mechanical properties						
	Dry paper						Wet paper
	Basis Weight (g/m^2)	Folding endurance	Tensile index (N.m/g)	Tear index ($mN.m^2/g$)	Burs index ($kPa.m^2/g$)	Smooth index (sec)	Tensile index (g)
Control	103.43±2.63^{a}	829±15^{b}	30.99±2.11^{a}	61.93±2.61^{a}	3.12±0.03^{a}	0.78±0.01^{b}	107.60±4.70^{c}
9	105.80±1.79^{a}	767±12^{b}	22.62±1.22^{b}	50.81±1.56^{b}	3.06±0.01^{a}	1.31±0.3^{a}	159.93±3.59^{b}
11	105.61±2.53^{a}	1638±28^{a}	30.84±1.30^{a}	55.45±1.55^{ab}	2.97±0.02^{a}	1.16±0.02^{a}	320.20±5.32^{a}
13	105.04±1.42^{a}	1457±45^{ab}	32.76±1.32^{a}	54.28±2.54^{ab}	3.10±0.3^{a}	1.26±0.04^{a}	300.86±4.30^{a}

Means within the same column followed by similar superscripts are not significantly different at the 5% level ($P<0.05$) by DMRT.

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษสาที่ผ่านการแช่น้ำแล้ว

สมบัติเชิงกลของกระดาษสาที่เคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนน 0.5% แช่สารละลายด่างโซเดียมคาร์บอเนตที่ pH 11 เวลา 20 นาที ล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วแช่ในน้ำต่ออีกที่ 0 2 4 6 8 และ 10 ชั่วโมง โดยใช้กระดาษที่ 0 ชั่วโมง เป็นตัวเปรียบเทียบ ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลกระดาษแห้งและกระดาษเปียกปรากฏว่าน้ำหนักมาตรฐานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ ความต้านทานแรงหักพับ ความต้านทาน

แรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด ความต้านทานแรงดันทะลุ และความเรียบมีความแตกต่างกันทั้งกระดาษแห้งและกระดาษเปียก สมบัติเชิงกลของกระดาษเพิ่มขึ้นตามเวลาของการแช่น้ำที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาที่แช่น้ำได้นานสุดคือ 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นสมบัติเชิงกลของกระดาษเริ่มลดลง แสดงว่าสภาพของเจลกลูโคแมนแนนที่ผ่านการปรับสภาพเป็นเจลไม่ละลายน้ำนั้นเป็นจริง จึงทำให้กระดาษไม่ขาดในขณะที่แช่น้ำความแข็งแรงของกระดาษเปียกและแห้งยังเหมือนเดิมแม้ผ่านการแช่น้ำถึง 8 ชั่วโมง ความแข็งแรงของกระดาษที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างของเจล (Saito et al., 2005; Martin et al., 2001) สมบัติเชิงกลของกระดาษแห้งจะดีกว่ากระดาษที่เปียกเนื่องจากน้ำทำให้การยึดเกาะกันของเส้นใยลดลงและเจลที่เคลือบจะมีลักษณะเป็นกาวกระดาษเปียกน้ำจึงมีความต้านทานแรงดึงน้อยกว่ากระดาษที่แห้ง (Table 2)

Table 2 Mechanical properties comparison of Saa paper coated with 0.5% glucomannan solution at different water soaking time.

Water Soaking Time (hr)	Mechanical properties						
	Dry paper						Wet paper
	Basis Weight (g/m^2)	Folding endurance	Tensile index (N.m/g)	Tear index ($mN.m^2/g$)	Burs index ($kPa.m^2/g$)	Smooth index (sec)	Tensile index (g)
0	103.20 ± 3.10^{a}	635 ± 26^{b}	26.82 ± 1.26^{ab}	54.28 ± 2.54^{ab}	3.11 ± 0.03^{b}	0.78 ± 0.01^{d}	255.20 ± 2.25^{d}
2	108.24 ± 3.18^{a}	662 ± 36^{b}	23.49 ± 1.23^{b}	50.85 ± 2.50^{b}	3.39 ± 0.02^{ab}	1.41 ± 0.02^{c}	288.20 ± 2.28^{cd}
4	108.98 ± 3.16^{a}	786 ± 28^{b}	28.61 ± 1.28^{ab}	56.09 ± 2.56^{ab}	3.64 ± 0.03^{ab}	1.57 ± 0.01^{bc}	503.46 ± 3.50^{a}
6	109.01 ± 3.19^{a}	1386 ± 38^{a}	28.57 ± 1.20^{ab}	56.69 ± 1.60^{a}	3.72 ± 0.04^{ab}	2.32 ± 0.03^{a}	360.20 ± 4.36^{b}
8	105.94 ± 3.15^{a}	1494 ± 49^{a}	32.01 ± 1.31^{a}	62.07 ± 2.62^{ab}	3.96 ± 0.02^{a}	2.12 ± 0.04^{ab}	324.66 ± 2.32^{bc}
10	106.01 ± 3.16^{a}	819 ± 31^{b}	26.54 ± 1.26^{ab}	57.44 ± 2.57^{ab}	3.44 ± 0.21^{ab}	1.84 ± 0.08^{abc}	282.26 ± 3.28^{cd}

Means within the same column followed by similar superscripts are not significantly different at the 5% level ($P<0.05$) by DMRT.

สรุป

กระดาษสาที่เคลือบด้วยสารละลายกลูโคแมนแนนแล้ว ผ่านการแช่ด้วยสารละลายด่างโซเดียมคาร์บอเนตที่ pH 11 จะช่วยเปลี่ยนสภาพของเจลจากเดิมที่ละลายน้ำได้ กลายเป็นเจลที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้กระดาษสาสามารถแช่อยู่ในน้ำได้นานถึง 8 ชั่วโมง โดยที่สมบัติเชิงกลของกระดาษเปียกน้ำและกระดาษแห้งไม่ลดน้อยไปกว่าเดิม กระดาษสาที่ผ่านการแช่น้ำมาแล้วสามารถนำมาทำผลิตภัณฑ์เหมือนกับกระดาษสาทั่วไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนให้ทุนในการศึกษาทดลองในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ทะดะโอะ, 2542 **มาตรฐานการกำหนดเกรดของเปลือกปอสาประเทศไทยและประเทศลาว**. เอกสารประกอบการสัมมนา เรื่อง บทบาทของปอสาในวงจรธุรกิจขนาดเล็กและขนาดกลาง ณ อาคารสารนิเทศ 50 ปี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 7 น.

บังอร เทียมศิริ และยุพา ศิติสาร, 2532. **ปอสา**. ศูนย์บริการเอกสารการวิจัยแห่งประเทศไทย สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 38 น.

เพิ่มศักดิ์ สุภาพรเหมินทร์, สว่าง ขัดขาว, อินทรัตน์ เสราดี, ศุภชัย แก้วมีชัย, วันชัย สร้อยอินทรากุล, วิโรจน์ วจนานวัช และชาญชัย สมาศิลป์, 2538. **เทคโนโลยีการผลิตปอสาและกระดาษสา**. ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่ สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 113 น.

โยชินาริ โคบายาชิ, 2543. **กลยุทธ์ในการปรับปรุงการผลิตกระดาษสาไทยเพื่อการนำเสนอในตลาดสากล**. เอกสารประกอบการประชุมเชิงปฏิบัติการ เรื่องการปลูกและการแปรรูปปอสา วันที่ 27-30 สิงหาคม ณ โรงแรมสีหราช อำเภอเมือง อุตรดิตถ์ 8 น.

วิชัย หฤทัยธนาสันติ์, วิขัณฑ์ อรรพานุรักษ์, วิทยา ปั้นสุวรรณ, วุฒินันท์ คงทัด, วารุณี ธนะแพสย์, ปริศนา สิริอาชา, บุศรินทร์ คงเสรี และวราภรณ์ อภิวัฒนาภิวัต, 2545. **การปรับปรุงกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษจากปอสา**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 63 น.

วิทยา ปั้นสุวรรณ, 2540. **การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้สำหรับอุตสาหกรรมกระดาษ**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 14 น.

สุชาดา อุชชิน, บุญฤทธิ์ ชูประยูร, วิขัณฑ์ อรรณพานุรักษ์, ปริศนา สิริอาชา และ วิชัย หฤทัยธนาสันติ์, 2545. **วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและคุณสมบัติของวัตถุดิบปอสาในการผลิตเยื่อและกระดาษ**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร. 80 น.

อำนาจ ธีระวานิช, วารุณี ธนะแพสย์, ศุภร เสรีรัตน์, กิริยา จริยเวชช์วัฒนา, ฤดี ธีระวานิช, อัควรรณ์ แสงวิภาค, จุฑามาศ ทวีไพบูลย์วงษ์, นิภา นิรุตติกุล, Rosalind C. Paige, วุฒินันท์ คงทัด, สุมาลี สุนทรนฤรังสี และมนูญ จันทร์ประสิทธิ 2545. **การตลาดและการเพิ่มมูลค่ากระดาษสา** คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.142 น.

Amada. K., 1988. **What is the secret of the strength of Washi.** Hand book on the art of Washi. Pubished by Wagami-do KK 33-8 Hakusan u-chome, Bunkyo-ku Tokyo. pp. 14-15

Anonymous. 2002. **TAPPI Test Method.** The Technical Association of the Pulp and Paper Industry. TAPPI Press, Atlanta, Georgia.

Browning B. L. 1967. **Methods of Wood Chemistry**. Interscience Publisher

Casey, J.P. 1980. **Wood pulp.** Pulp and paper chemistry technology. Vol. 1. 3d ed., John Wiley & Sons, New York. 820 p.

Chen, Y., Zhang, L. N., Lu, Y. S., Ye, C. S., & Du, L. B. 2003. **Preparation and properties of water-resistant soy dreg/benzyl konjac glucomannan composite plastics.** Journal of Applied Polymer Science, 90 (14), 3790–3796.

Franklin, G.L. 1945. **Preparation of thin section of synthetic resins and wood-resins composite, and a new method for wood.** Nature 155.3924-3951.

Glucmannan. Com. 2002. **Glucmannan.** http://www.glucmannan. Com/gum.htm

Martin, L. and C, Felby. 2001. **Wet strength improvement of unbleached kraft pulp through laccase catalyzed oxidation.** Enzyme and Microbial Technology Volume 28, Issues 9–10, 7 June 2001, Pages 760–765

Ohkawa. A., 1988. **What Kind of material is used to impart color to washi and The method.** Hand book on the art of Washi. Pubished by Wagami-do KK 33-8 Hakusan u-chome, Bunkyo-ku Tokyo. pp. 56-57

Rydolm, S.A. 1967. **Pulping Processes.** John Wiley & Sons, New York. 1167 p.

Scientificpsychic. Com. 2004. **Carbohydrates.** http://www.scientificpsychic. Com/fitness/carbohydrates.html

Saito, T. and I, Akira. 2005. **A novel method to improve wet strength of paper.** Dept. of Biomaterial Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, JAPON

Tang, R., Du, Y., Zheng, H., Fan, L. 2003. **Preparation and Characterization of Soy Protein Isolate - Carboxymethylated Konjac Glucomannan Blend Films.** Journal of Applied Polymer Science, 88, 1095–1099.

Umemura, K., Inoue, A., Kawai, S. 2003. **Development of new natural polymer-based wood adhesives I: dry bond strength and water resistance of konjac glucomannan, chitosan, and their composites.** J Wood Sci 49, 221–226.

ผลของสายพันธุ์ต่อสารให้กลิ่นระเหยในเนื้อและน้ำเม่า

Effect of Variety on Volatile Aroma Compounds in Mao Pulp and Juice

วันเพ็ญ จิตรเจริญ[1*] ลัดดาวัลย์ ปาปิน[1] ธัญลักษณ์ บัวผัน[1] และลชินี ปานใจ[1]

Wanphen Jitjaroen[1*], Laddawan Papin[1], Tunyaluk Bouphun[1] and Lachinee Panjai[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของสารให้กลิ่นระเหยของผลเม่า 4 สายพันธุ์คือ ฟ้าประทาน คำตา ห้วยบาง และแสนโฮม โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรเมทรี พบว่าสายพันธุ์เม่ามีผลต่อชนิดของสารที่ให้กลิ่นในผลเม่า สามารถแบ่งโครมาโตรแกรมเป็น 5 กลุ่ม คือ เอสเทอร์ แอลดีไฮด์ คีโทน เทอร์พีนอยด์ และแอลกอฮอล์ เมื่อเทียบจากค่าร้อยละ peak area contribution พบว่าแต่ละสายพันธุ์มีสารให้กลิ่นหลักที่แตกต่างกันโดยสารให้กลิ่นระเหยหลักที่พบในผลเม่าสายพันธุ์ฟ้าประทานประกอบด้วย 2-pentanone, (±)-3-carene และ 1-hexanol เป็นกลุ่มสารที่ให้กลิ่นส้มและกลิ่นเขียว ผลเม่าสายพันธุ์คำตาประกอบด้วย 2-hexanal, 2-pentanone, (±)-3-carene, 1-hexanol และ phenol เป็นกลุ่มสารที่ให้กลิ่นส้มกลิ่นเขียว และให้ความฝาดเฝื่อน ผลเม่าสายพันธุ์ห้วยบาง พบ 1-hexanal, 2-hexenal, ethyl hexanoate และ (±)-3-carene เป็นกลุ่มสารที่ให้กลิ่นเขียวกลิ่นผลไม้และกลิ่นส้ม และผลเม่าสายพันธุ์แสนโฮมประกอบด้วย 2-pentanone และ 1-hexanol เป็นกลุ่มสารที่ให้กลิ่นผลไม้และกลิ่นเขียว โดยสารให้กลิ่นส่วนใหญ่ถูกสกัดออกมาอยู่ในน้ำเม่าเป็นกลุ่มสารที่ให้กลิ่นผลไม้และดอกไม้ และยังคงเหลือสารให้กลิ่นบางชนิดอยู่ในเนื้อเม่าซึ่งส่วนใหญ่เป็นกลุ่มสารที่ให้กลิ่นเขียว

ABSTRACT

The purpose of the study was to identify type of volatile aroma compounds in four different mao varieties (Fah-pra-tan, Kam-ta, Heuy-bang and San-home). The compounds were determined by using Gas Chromatography-Mass Spectrometry. Different mao varieties affected volatile aroma compounds. The compounds which were found were divided into 5 groups: esters, aldehydes, ketone, terpenoids and alcohol. The main volatile compounds were qualified in the form of % peak area contribution. It found that Fah-pra-tan contained 2-pentanone, (±)-3-carene and 1-hexanol (citrusy, greeny); Kam-ta contained 2-hexanal, 2-pentanone, (±)-3-carene, 1-hexanol and phenol (citrusy, greeny, astringency); Heuy-bang contained 1-hexanal, 2-hexenal, ethyl hexanoate and, (±)-3-carene (greeny, fruity, citrusy); San-home contained 2-pentanone and 1-hexanol (greeny). Most of aroma compounds was extracted into the juice with fruity and floral notes, and greeny note remained in the pulp.

Key Words: mao, volatile aroma compounds

* Corresponding author; e-mail address: **wanphenjit@hotmail.com**

[1]สาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง 52000

[1]Department of Agro-industry, Rajamangala University of Technology, Lanna Lampang 52000

คำนำ

กลิ่นของผลไม้แต่ละชนิดจะมีเอกลักษณ์เฉพาะ และเป็นคุณลักษณะสำคัญที่จะสร้างความประทับใจและการยอมรับของผู้บริโภค ผลไม้แต่ละชนิดจะสร้างสารให้กลิ่นทั้งชนิดและปริมาณที่แตกต่างกันไป ขึ้นกับลักษณะทางพันธุกรรมระดับความสุก สภาวะแวดล้อม วิธีการจัดการในแปลงปลูก การเก็บผลผลิต และการขนส่ง (Muna *et al*., 2013) สารให้กลิ่นหลักในผลไม้ประกอบด้วยกลุ่มของเอสเทอร์ แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน แล็กโทน เทอร์พีนอยด์ และอโพแคโรทีนอยด์ (apocarotenoids) โดยการสังเคราะห์ผ่านวิถีการย่อยสลายทางชีวเคมีของไขมัน กรดแอมิโน เทอร์พีนอยด์ และแคโรทีนอยด์ (Schwab *et al*., 2008) กลิ่นของผลไม้จึงเป็นความผสมผสานที่ซับซ้อนของสารที่ระเหยได้หลายชนิดร่วมกันโดยอาจพบสารชนิดเดียวกันในผลไม้หลายๆ ชนิดแต่มีในปริมาณที่แตกต่างกันไป (Sanz *et al*., 1997; Schwab *et al*., 2008) เม่าหรือมะเม่า ชื่อวิทยาศาสตร์ *Antidesma thwaitesianum* อยู่ใน Family Euphorbiaceae และ subfamily Phyllanthaceae เป็นผลไม้ตระกูลเบอร์รี (Hoffmann, 2005) นิยมปลูกกันมากในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตที่มีคุณภาพได้มากกว่า 120 ตันต่อปี (คณพ, 2551) มีคุณค่าทางโภชนาการสูงอุดมไปด้วยวิตามินบี1 บี2 ซี และอี กรดแอมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายถึง 18 ชนิด (กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ, 2547) และสารต่อต้านอนุมูลอิสระ (ลัดดาวัลย์ และคณะ, 2554) มีกลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์ เพราะมีสารให้กลิ่นที่สำคัญหลายชนิดและแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์เม่า ซึ่งปัจจุบันมีงานวิจัยด้านการตรวจวิเคราะห์สารให้กลิ่นในผลเม่าไม่มากนัก งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดและองค์ประกอบของสารให้กลิ่นของผลเม่าสายพันธุ์ต่างๆ ที่นิยมปลูกกันมาก ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางแก่เกษตรกรและผู้ประกอบการในการคัดเลือกสายพันธุ์ผลเม่าเพื่อการบริโภคสด และการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการของตลาดต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่างน้ำเม่า

เก็บผลเม่าที่ปลูกในเขตอำเภอภูพาน จังหวัดสกลนคร จำนวน 4 สายพันธุ์ คือ ฟ้าประทาน ห้วยบางคำตา และแสนโฮม ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมใช้บริโภคสดและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ คัดเลือกผลที่มีสีแดงดำ ล้างผลเม่าด้วยน้ำ แล้วบีบคั้นน้ำเม่าด้วยเครื่องบีบคั้นน้ำผลไม้แบบไฮดรอลิค (ดัดแปลงจาก Jitjaroen, 2007) เก็บแยกส่วนน้ำเม่าและเนื้อเม่า (กากที่ได้จากการคั้นน้ำ)

การวิเคราะห์สารให้กลิ่น

เตรียมตัวอย่างเป็น 2 ส่วนคือ น้ำเม่าปริมาตร 10 มิลลิลิตร และเนื้อเม่าปริมาณ 5 กรัม ใส่ในขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร ปิดฝา บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เทคนิค Headspace solid phase microextraction ไฟเบอร์ชนิด Polydimethylsiloxane ขนาดความหนาของฟิล์ม 100 ไมโครเมตร นำไปวิเคราะห์หาชนิดของสารให้กลิ่นระเหยด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (7890A, Hewlett Packard, Agilent) ฉีดตัวอย่างเข้าเครื่องด้วยระบบสุญญากาศ (G1888A, Agilent) ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ใช้คอลัมน์ชนิด DB5ms (0.25 มิลลิเมตร x 30 เมตร x 0.25 ไมโครเมตร) ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นเฟสเคลื่อนที่ อัตราการเคลื่อนที่ 1 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิขาเข้า 160 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนตู้อบเริ่มต้นที่ 35 องศาเซลเซียส คงไว้เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 250 องศาเซลเซียส ในอัตรา 25 องศาเซลเซียสต่อนาที คงไว้เป็นเวลา 15 นาที ใช้ดีเทคเตอร์ชนิด Mass Selective Detector (5975C, Agilent)

อุณหภูมิ quadrupole 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ mass ion source 150 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบ mass spectra ของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์โดยใช้ libraries search ของ W8N05ST และ NIST08 (Agilent Technologies, 2007) รายงานผลชนิดของสารให้กลิ่นเป็นกลุ่ม แต่ละกลุ่มแสดงผลเป็นร้อยละของ peak area contribution (คำนวณเป็นร้อยละของสารให้กลิ่นทุกชนิดที่ตรวจพบโดยเปรียบเทียบในแต่ละสายพันธุ์)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาชนิดสารให้กลิ่นระเหยในผลเม่าจำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ ฟ้าประทาน คำตา แสนโฮม และห้วยบาง ทั้งในส่วนของน้ำเม่าและเนื้อเม่า พบว่า สายพันธุ์เม่ามีผลต่อชนิดและปริมาณของสารให้กลิ่นระเหย สามารถแบ่งโครมาโตแกรมของสารให้กลิ่นระเหยได้เป็น 5 กลุ่มคือ เอสเทอร์ แอลดีไฮด์ คีโทน เทอร์พีนอยด์ และแอลกอฮอล์ และมีค่า %peak area contribution แตกต่างกันไปตามสายพันธุ์และส่วนที่รับประทานได้ของผลเม่า (Figure 1) ดังนี้

ผลเม่าสายพันธุ์ฟ้าประทาน ประกอบด้วยสารให้กลิ่นจำนวน 12 ชนิด แบ่งเป็นที่พบในน้ำเม่าจำนวน 8 ชนิด ได้แก่ 2-pentanone, α-limonene, β-ocimene, α-terpinene, (±)-3-carene, β-pinene, α-calacorene และ 1-hexanol และเนื้อเม่าจำนวน 7 ชนิด ได้แก่ 1-hexanal, 2-hexenal, hexyl acetate, octanal, 2-pentanone, (±)-3-carene และ 1-hexanol

ผลเม่าสายพันธุ์คำตา ประกอบด้วยสารให้กลิ่นจำนวน 13 ชนิด แบ่งเป็นที่พบในน้ำเม่าจำนวน 9 ชนิด ได้แก่ 2-hexenal, α-limonene, limonene, β-ocimene, α-terpinene, (±)-3-carene, α-calacorene, 1-hexanol และ phenol และเนื้อเม่าจำนวน 6 ชนิด ได้แก่ 1-hexanal, 2-hexenal, octanal, nonanal, 2-pentanone และ (±)-3-carene

ผลเม่าสายพันธุ์ห้วยบาง ประกอบด้วยสารให้กลิ่นจำนวน 10 ชนิด แบ่งเป็นที่พบในน้ำเม่าจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ ethyl hexanoate, α-limonene, α-terpinene, (±)-3-carene และ α-calacorene และเนื้อเม่าจำนวน 6 ชนิด ได้แก่ 1-hexanal, 2-hexenal, ethyl hexanoate, octanal, nanonal และ (±)-3-carene

ผลเม่าสายพันธุ์แสนโฮม ประกอบด้วยสารให้กลิ่นระเหยจำนวน 11 ชนิด แบ่งเป็นที่พบในน้ำเม่าจำนวน 9 ชนิด ได้แก่ 1-hexanal, 2-hexenal, α-limonene, β-ocimene, α-terpinene, (±)-3-carene, α-terpinolene, α-calacorene และ 1-hexanol และเนื้อเม่าจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ 1-hexanal, 2-hexenal, octanal, 2-pentanone และ (±)-3-carene

เมื่อพิจารณาแยกสารประกอบเป็นกลุ่มและเทียบค่า %peak area contribution แยกตามสายพันธุ์ ดังแสดงใน Table 1 พบว่าสารประกอบหลักของกลุ่ม hexanol ได้แก่ 1-hexanal และ 2-hexenal โดยพบในส่วนของเนื้อเม่าในสายพันธุ์ห้วยบางสูงถึง 71.75 และ 17.67 ตามลำดับ สารทั้งสองชนิดนี้เป็นสารที่ให้กลิ่นเขียว (Kakiuchi and Ohmiya, 1991) มักพบในผลไม้ที่ยังไม่สุก สารนี้จะลดลงเมื่อผลเริ่มสุก เกิดจากการย่อยสลายของกรดไขมันไม่อิ่มตัวด้วยเอนไซม์ (Paillard and Rouri, 1984) และยังเกิดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันกลุ่มไลโนเลอิกและไลโนเลนิก โดยมีเอนไซม์ lipoxygenase เป็นตัวเร่ง ในช่วงที่ทำการบดคั้นน้ำผลไม้ เช่น ในระหว่างการทำน้ำแอปเปิล (Paillard and Rouri, 1984) แสดงให้เห็นว่าเม่าสายพันธุ์ห้วยบางมีกลิ่นเขียวสูง

กว่าสายพันธุ์อื่น โดยการที่พบกลุ่ม hexanol ในเม่าที่สุกเนื่องจากในการบีบน้ำเม่าได้ทำการบีบเม่าทั้งผลจึงทำให้มีสารจำพวก hexanol ซึ่งให้กลิ่นเขียวออกมาจากเมล็ดเม่าด้วย

เอสเทอร์เป็นสารให้กลิ่นระเหยหลักที่ให้กลิ่นของดอกไม้และผลไม้นานาชนิด พบเอสเทอร์หลัก 2 ชนิด คือ hexyl acetate และ ethyl hexanoate โดยพบ hexyl acetate เล็กน้อยเฉพาะในเนื้อเม่าสายพันธุ์ฟ้าประทาน ส่วน ethyl hexanoate พบมากในน้ำและเนื้อเม่าสายพันธุ์ห้วยบางเท่านั้น มักพบ hexyl acetate เป็นเอสเทอร์หลักในผลไม้ เช่น พีช และแนคทารีน (Wang *et al*., 2009) และให้กลิ่นสตรอเบอร์รีในผลองุ่น (Buratti *et al*., 2006; Komes *et al*., 2005)

แอลดีไฮด์เป็นสารที่ให้กลิ่นระเหยของกลิ่นเขียว ผักผลไม้ ดอกไม้ ผลไม้ตระกูลส้ม และกลิ่นเนื้อสัตว์ (Hognadottir and Rouseff, 2003) พบแอลดีไฮด์หลัก 2 ชนิด คือ octanal และ nonanal โดยมีค่า %peak area contribution ของ octanal ในเนื้อเม่าทุกสายพันธุ์ต่ำมาก คือ 0.92-1.96 และพบ nonanal เฉพาะในเนื้อเม่าสายพันธุ์ห้วยบางและคำตา คือ 6.52 และ 4.95 ในปริมาณใกล้เคียงกัน

คีโทน เป็นสารที่ให้กลิ่นระเหยของผลไม้ (Nykänen and Nykänen, 1983) ผลการศึกษาพบคีโทน 1 ชนิดคือ 1-pentanone มี %peak area contribution สูงมาก ในเนื้อเม่าสายพันธุ์แสนโฮม คำตา และฟ้าประทาน คือ 87.36, 77.44 และ 24.66 ตามลำดับ ส่วนในน้ำเม่าพบเฉพาะในสายพันธุ์ฟ้าประทานคือ 51.33 คีโทนบางชนิดจะให้กลิ่นเฉพาะของผลไม้ เช่น **γ** และ **δ**–decalactone จะให้กลิ่นของพีช ในขณะที่คีโทนชนิดอื่นจะให้กลิ่นของดอกไม้และผลไม้ (Horvat *et al*., 1990)

เทอร์พีนอยด์เป็นสารที่ให้กลิ่นของผลไม้ ผลการศึกษาพบเทอร์พีนอยด์จำนวน 8 ชนิดคือ α-limonene, limonene, β-ocimene, α-terpinene, (±)-3-carene, α-terpinolene, β-pinene, และα-calacorene สารกลุ่มเทอร์พีนอยด์ทั้งหมดนี้มี %peak area contribution สูงในน้ำเม่าทุกสายพันธุ์ คือ 30.83-62.13 น้ำเม่าสายพันธุ์ฟ้าประทานมีปริมาณสูงกว่าสายพันธุ์คำตา แสนโฮม และห้วยบาง ตามลำดับ โดยพบ α-limonene, β-ocimene, α-terpinene, β-pinene และ α-calacorene มีปริมาณสูงสุดในน้ำเม่าสายพันธุ์ฟ้าประทาน ส่วน limonene พบเฉพาะในน้ำเม่าสายพันธุ์คำตา และ (±)-3-carene พบในน้ำเม่าและเนื้อเม่าทุกสายพันธุ์ โดยพบมากที่สุดในน้ำเม่าสายพันธุ์ฟ้าประทานคำตา และห้วยบาง มักพบเทอร์พีนอยด์ในผลไม้หลายชนิด เช่น linalool ให้กลิ่นของพีชและแนคทารีน และมีความเข้มข้นสูงขึ้นในระยะที่ผลเริ่มสุก (Horvat *et al*., 1990) พบ (±)-3-careneสูงในมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins (Malundo *et al*.,1997) พบ α-terpinolene, α-3-carene, D-limonene, α-terpinene, และ α-pinene ซึ่งให้กลิ่นหอมของดอกไม้และกลิ่นต้นสนในมะม่วงสายพันธุ์โชคอนันต์ (พิริยา และบุศราภรณ์, 2550) และพบ D-limonene ในองุ่นสายพันธุ์ Alexandria Rocha (Ribereau-Gayon *et al*., 1975) ชี้ให้เห็นว่าเทอร์พีนอยด์เป็นสารให้กลิ่นระเหยหลักที่พบในเม่าทุกสายพันธุ์ และเป็นไปได้ว่าอาจเป็นสารสำคัญที่ให้กลิ่นผลไม้และดอกไม้แก่ผลเม่า

แอลกอฮอล์ เป็นสารให้กลิ่นของหญ้าเขียวสดและกลิ่นหวาน (Russell, 2006) ผลการศึกษาพบ Alcohol 1 ชนิดคือ 1-hexanol และมี %peak area contribution เมื่อเปรียบเทียบของแต่ละสายพันธุ์แล้วค่อนข้างสูง โดยเฉพาะในน้ำเม่าสายพันธุ์แสนโฮม และเนื้อเม่าสายพันธุ์ฟ้าประทาน คือ 62.10 และ 49.39 ตามลำดับ แต่ไม่พบในเม่าสายพันธุ์ห้วยบางเลย และมีอัตราส่วนค่อนข้างใกล้เคียงกันในสายพันธุ์คำตา ฟ้าประทาน และแสนโฮม นอกจากนี้ยังมีสารประกอบฟีนอลซึ่งเป็นสารที่พบบนผิวและเมล็ด พบว่าผลเม่ามี %peak

area contribution คือ 15.44 โดยพบเฉพาะในน้ำเม่าสายพันธุ์คำตาเท่านั้น มักพบสารกลุ่มนี้เช่นกันในองุ่นแดง ซึ่งมีสารประกอบฟีนอลหลักคือ ฟลาโวนอยด์ เช่น ฟลาโวนอล แอนโทไซยานิน แทนนิน และคาเทชิน (Mattivi *et al*., 2006)

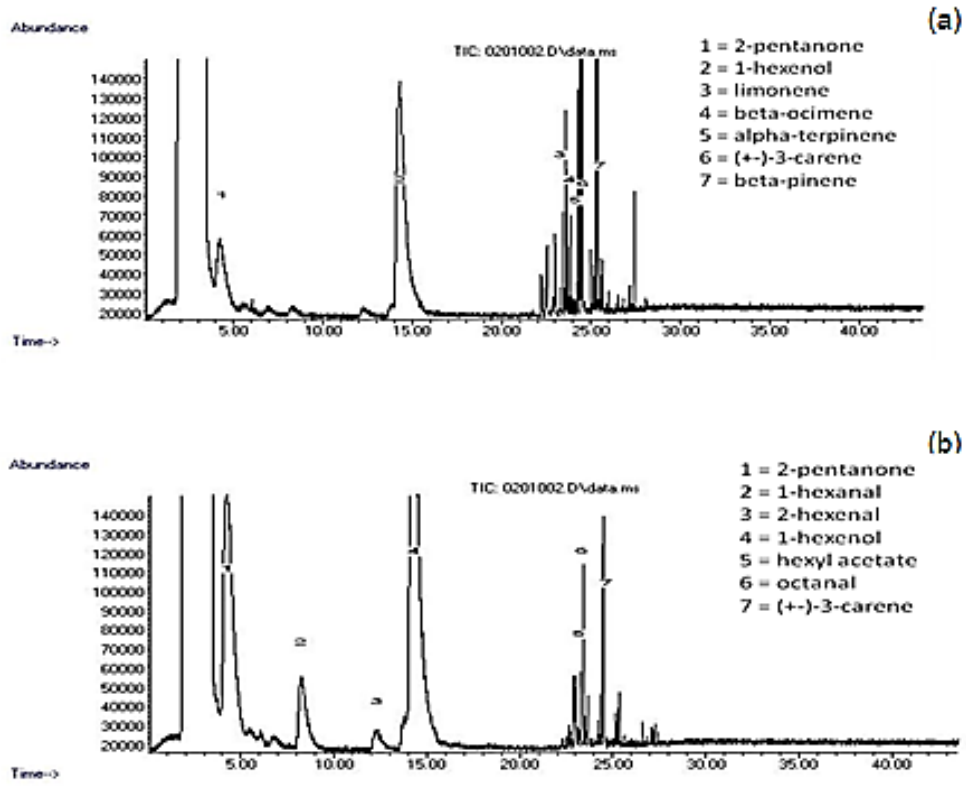


Figure 1 GC-chromatograms of volatile aroma compounds extracted from (a) mao juiceand (b) mao pulp

สรุป

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าผลเม่ามีชนิดของสารให้กลิ่นระเหยที่มีความแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ มีจำนวนชนิดสารให้กลิ่นที่พบในน้ำเม่ามากกว่าในเนื้อเม่า โดยหลังจากการคั้นน้ำเม่าแล้วสารให้กลิ่นส่วนใหญ่ถูกสกัดออกมาอยู่ในน้ำเม่าได้มากซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารกลุ่มที่ให้กลิ่นผลไม้และดอกไม้ และยังคงเหลือสารให้กลิ่นบางชนิดอยู่ในเนื้อเม่าซึ่งส่วนใหญ่เป็นกลุ่มที่ให้กลิ่นเขียว อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอีกหลายประการที่เกี่ยวข้องกับชนิดและปริมาณสารให้กลิ่นต่างๆ ได้แก่ ระดับความสุก แหล่งที่ปลูก ระดับความสุกในขณะที่เก็บเกี่ยว กระบวนการแปรรูป การเก็บรักษา และวิธีการทำให้สุกหรือการบ่ม (Malundo *et al*. 1997) โดยผลการศึกษาทำให้ทราบชนิดสารให้กลิ่นเฉพาะที่พบในผลเม่าทั้ง 4 สายพันธุ์ และเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับนักวิชาการและผู้ประกอบการในการคัดเลือกสายพันธุ์เม่าที่เหมาะสมในการปลูก เพื่อรองรับความพึงพอใจของผู้บริโภคที่ต้องการบริโภคสด และอุตสาหกรรมแปรรูปเม่าให้เป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถควบคุมชนิดของสารให้กลิ่นรสที่พึงประสงค์และไม่เป็นที่พึงประสงค์ในผลเม่าที่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างการแปรรูป อย่างไรก็ตาม ควรศึกษาเพิ่มเติมด้านปริมาณความเข้มข้นของสารให้กลิ่นที่พบในเม่าแต่ละสายพันธุ์ ร่วมกับการประเมินคุณลักษณะกลิ่นรสและความเข้มทางประสาทสัมผัส และศึกษาสายพันธุ์เม่าอื่นๆ เพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความหลากหลายและเป็นทางเลือกมากขึ้น

Table 1 Percentage of peak area contribution among four different mao varieties extracted from mao juice and mao pulp

Retention time	Compounds	Juice (peak area contribution)				Pulp (peak area contribution)				Aroma description (Leffingwell and Associates, 1985)
		Fah-pra-tan	Kam-ta	Heuy-bang	San-home	Fah-pra-tan	Kam-ta	Heuy-bang	San-home	
	Esters									
23.42	hexyl acetate	-	-	-	-	4.65	-	-	-	fruity, spicy, rubbery, tobacco, citrus, green, herbs
23.20	ethyl hexanoate	-	-	29.41	-	-	-	1.96	-	fruity, strawberry, anise, wine, gum, sweet
	Aldehydes									
8.26	1-hexanal	-	-	-	4.50	16.27	6.75	71.75	3.83	green, fruity, corn, tallowy, fishy, grassy, herbs, leave
12.28	2-hexenal	-	4.35	-	2.57	1.74	7.65	17.67	6.97	green, banana
23.26	octanal	-	-	-	-	1.16	1.80	1.96	0.92	lemon, stew, rancid, soapy, citrus, green, flower, fruit,
24.53	nonanal	-	-	-	-	-	4.95	6.52	-	green, fruit, floral, sweet, melon, lavender, citrus fruit
	Ketone									
4.24	2-pentanone	51.33	-	-	-	24.46	77.44	-	87.36	ether, fruit
	Terpenoids									
23.61	α-limonene	5.34	6.21	15.44	6.42	-	-	-	-	licorice, green, citrus, ethereal, fruity
25.33	limonene	-	8.28	-	-	-	-	-	-	citrus, orange, fruity, peel
23.87	β-ocimene	1.28	4.35	-	2.57	-	-	-	-	citrus, herbaceous
24.32	α-terpinene	5.34	8.28	2.21	6.42	-	-	-	-	gasoline, ethereal, fruity, lemon
24.47	(±)-3-carene	17.08	26.92	29.41	5.78	2.32	1.41	0.20	0.92	citrus, orange peel
25.59	α-terpinolene	-	-	-	5.14	-	-	-	-	woody, fruit, sweet, pine, slightly anise
25.68	β-pinene	4.48	-	-	-	-	-	-	-	musty, green, sweet, pine, resin, turpentine, woody
27.43	α-calacorene	3.20	8.09	15.44	4.50	-	-	-	-	dry wood
	Alcohol									
14.24	1-hexanol	11.95	41.61	-	62.10	49.39	-	-	-	cut grass, sweet
27.17	**Phenol**	-	15.44	-	-	-	-	-	-	phenol, astringent

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยและสาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ. 2547. **ต้นเม่า หรือ มะเม่า หรือ หมากเม่ามีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Antidesma Thwaitesianum* เม่า, มะเม่า, หมากเม่า**. แหล่งที่มา: http://www.winemao.com. 5 กันยายน 2551.

คณพ วรรณวงศ์. 2551. **ชมรมหมากเม่าจังหวัดสกลนคร**. สกลนคร.

พิริยาอร วรรณปิยะรัตน์ และบุศราภรณ์ มหาโยธี. 2550. สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งมะม่วงแบบธรรมชาติโดยที่ไม่มีการเติมน้ำตาลและสารกลุ่มเมตาไบซัลไฟต์ที่สามารถรักษากลิ่นรสของผลไม้ได้ดีที่สุด. **วิทยาศาสตร์เกษตรศาสตร์**. 38 (5): 357-360.

ลัดดาวัลย์ ปาปิน วันเพ็ญ จิตรเจริญ ธัญลักษณ์ บัวผัน และลชินี ปานใจ. 2554. **ชนิดและปริมาณแอนโธไซยานินและสารให้กลิ่นระเหยที่เป็นเอกลักษณ์ในเม่า** (*Antidesma thwaitesanum* Müell.). รายงานวิจัย. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 28-31.

Agilent Technologies. 2007. **The Essential Chromatography and Spectroscopy**. Agilent Technologies, Inc.

Buratti, S., A. Rizzolo, S. Benedetit and D. Torreggiani. 2006. Electronic nose to detect strawberry aroma changes during osmotic dehydration. **Journal of Food Science** 71: 184-189.

Hoffmann, P. 2005. **Antidesma in Malesia and Thailand**. Kew Publishing Royal Botanic Gardens, Kew U.K. 292 p.

Hognadottir, A. and R.L. Rouseff. 2003. Identification of aroma active compounds in orange essence oil using gas chromatography - olfactometry and gas chromatography-mass spectrometry. **Journal of Chromatography A** 998: 201-211.

Horvat, R.J., G.W. Chapman, J.A. Robertson, F.I. Meredith, R. Scorza and A.M. Callahan. 1990. Comparison of the volatile compounds from several commercial peach cultivars. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 38: 234-237.

Jitjaroen, W. 2007. **Influence of yeast strains and nutritive supplements on enological characteristics of tropical fruit wines**. Cuvillier Verlag Göttingen. 85 p.

Kakiuchi, N. and A. Ohmiya. 1991. Changes in the composition and content of volatile constituents in peach fruits in relation to maturity at harvest and artificial ripening. **Journal of the Japanese Society for Horticultural Science** 60: 209-216.

Komes, D.I., K.K. Ganic, B. Cosic and T. Lovric. 2005. Aroma Profile of strawberry juice cocktail produced in industrial conditions. **Kemija u Industriji** 54: 135-141.

Leffingwell and Associates. 1985. **Flavor base 10**. Available Source: http://www.leffingwell.com/flav base.htm, December 10, 2009.

Malundo, T.M.M., E.A. Baldwin, M.G. Moshonas, R.A. Baker and R.L. Shewfeit. 1997. Method for the rapid headspace analysis of mango (*Magiferaindica* L.) homogenate volatile constituents and factors affecting quantitative results. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 45: 2187-2194.

Mattivi, F., R. Guzzon, U. Vrhovsek, M. Stefaniniand and R. Velasco. 2006. Metabolite Profiling of Grape: Flavonols and Anthocyanins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 54: 7692-7702.

Muna, A., F.J. Zhang, F.F. Wu, C.H. Zhou and J. Tao. 2013. **Advances in Fruit Aroma Volatile Research, Molecules**. 18: 8200-8229.

Nykänen, L. and I. Nykänen. 1983. Rum flavor. pp. 49-63. *In* J.R. Piggott. **Flavor of Alcoholic Beverages** Chichester, UK.

Paillard, N.M. and O. Rouri. 1984. Hexanal and 2-hexenal production by mashed apple tissues. **Lebensm. Wiss Technol**. 17 (6): 345-350.

Ribereau-Gayon, P., J.N. Boidron and A. Terrier. 1975. Aroma of Muscat grape varities. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 23: 1042-1047.

Russell, R. 2006. **Citrus research and education center**. Color and flavor chemistry group. University of Florida.

Sanz, C., J.M. Olias and A.G.Perez. 1997. Aroma biochemistry of fruits and vegetables. *In* Phytochemistry of Fruit and Vegetables, Oxford University Press Inc., New York, USA, pp. 125-155.

Schwab, W., R. Davidovich-Rikanati and E. Lewinsohn2008. Biosynthesis of plant-derived flavor compounds. **Plant Journal** 54: 712-732.

Wang, Y.J., C.X. Yang, S.H. Li, L. Yang, Y.N. Wang., J.B. Zhao and Q. Jiang. 2009. Volatile characteristics of 50 peaches and nectarines evaluated by HP-SPME with GC-MS. **Journal of Food Chemistry** 116: 356-364.

สารให้ความคงตัวที่เหมาะสมต่อคุณภาพของไวน์ลิ้นจี่

Stabilizing Agents Appropriated for Lychee Wine Quality

วันเพ็ญ จิตรเจริญ[1*] **นราทิพย์ คิดคร่อง**[1] และ วิรัญญา กันทวงศ์[1]

Wanphen Jitjaroen[1*], **Naratip Kidkrong**[1] and Wiranya Kanthawong[1]

บทคัดย่อ

การวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้สารให้ความคงตัวแบบผสมที่เหมาะสมในการผลิตไวน์ลิ้นจี่ แบ่งเป็นการใช้สารให้เกิดความคงตัว 2 ชนิด คือ สารป้องกันออกซิเดชัน (โพแทสเซียมเมแทไบซัลไฟต์ (KMS) 0.06 กรัมต่อลิตร และสารผสมของ KMS และกรดแอสคอร์บิก (1:1) 0.12 กรัมต่อลิตร) และสารช่วยตกตะกอน (เบนโทไนต์ (0 และ 1 กรัมต่อลิตร) และโพลิไวนิลโพลีไพรอลิดอล (PVPP) 0, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร) พบว่าไวน์มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูงโดยประเมินจากไม่มีตะกอนเมื่อทดสอบด้วยความร้อน และมีความคงตัวที่อุณหภูมิต่ำอยู่ในระดับปานกลางถึงดี โดยประเมินจากค่าการนำไฟฟ้าก่อนและหลังการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำเมื่อบ่มผ่านไปเป็นเวลา 6 เดือน ไวน์ทุกตัวอย่างที่ใช้สารช่วยตกตะกอนมีค่าความขุ่นลดลงแต่ยังสูงกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยการใช้ KMS ร่วมกับ PVPP 0.4 กรัมต่อลิตร และการใช้สารผสมของ KMS และกรดแอสคอร์บิกร่วมกับเบนโทไนต์ 1 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้อัตราการเกิดสีน้ำตาลของไวน์ลิ้นจี่ต่ำสุด คือ 0.772 และ 0.804 ตามลำดับ

ABSTRACT

The research was to study stabilizing agents which appropriated for lychee wine production. The use of 2 types of antioxidizing agent (0.06 g/L potassium metabisulphite (KMS), and the mixture of 0.12 g/L KMS and ascorbic acid (1:1)), and 2 types of fining agent (0, 1 g/L bentonite, and 0, 0.4 and 0.8 g/L polyvinylpolypyrrolidone (PVPP)) were determined. It found that the samples were stable at high temperature resulting from not precipitation by heat stability test. The samples were stable moderately to good level at low temperature resulting from conductivity value difference between before and after cold stability test. The turbidity decreased gradually during aging for six months but still higher than an appropriate level. The addition of KMS with 0.4 g/L PVPP, and mixture of KMS, ascorbic acid together with 1 g/L bentonite had less browning potential at 0.772 and 0.804, respectively.

Key Words: stabilizing agent, lychee wine, potassium metabisulphite, ascorbic acid, bentonite, polyvinylpolypyrrolidone

*Corresponding author; e-mail address: **wanphenjit@hotmail.com**

[1]สาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยราชมงคลล้านนา ลำปาง 52000

[1]Department of Agro-industry, Rajamangala University of Technology Lanna, Lampang 52000

คำนำ

ผลลิ้นจี่สุกมีกลิ่นหอมเป็นเอกลักษณ์เฉพาะ มีปริมาณน้ำตาลและกรดทั้งหมดค่อนข้างสมดุลสำหรับการหมักไวน์ แต่เนื่องจากในไวน์ลิ้นจี่มีสารต่างๆ เป็นส่วนประกอบอยู่มาก เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน พอลิฟีนอล และรงควัตถุ เมื่อบ่มไวน์ลิ้นจี่เป็นเวลานานอาจทำให้คุณภาพไม่คงตัวจากสาเหตุต่างๆ เช่น ความขุ่นจากโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตเมื่อเก็บที่อุณหภูมิสูง การเกิดผลึกของโพแทสเซียมไบทาร์เทรตบริเวณก้นขวดหรือจุกคอร์กเมื่อเก็บที่อุณหภูมิต่ำ และจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลได้ง่ายเมื่อบ่มเป็นเวลานานขึ้น จากผลการศึกษาของรุ่งเรืองรัตน์และจันจิรา (2558) ในไวน์ลิ้นจี่ที่ไม่ได้ผ่านการใช้สารให้ความคงตัว พบว่าเมื่อบ่มเป็นเวลา 6 เดือน ไวน์ยังคงมีค่าความขุ่นสูงอยู่ในช่วง 5.02-8.27 NTU จึงควรทำการปรับปรุงคุณภาพของไวน์ให้มีความคงตัวก่อนการบรรจุ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการใช้สารให้ความคงตัวผสมของสารป้องกันออกซิเดชันคือ KMS และกรดแอสคอร์บิก ร่วมกับสารช่วยตกตะกอน คือ เบนโทไนต์ซึ่งมีสมบัติจับกับสารประเภทโปรตีน และ PVPP ซึ่งมีสมบัติจับกับพอลิฟีนอล เพื่อทำให้ไวน์มีความใสและคงตัวในระหว่างการบ่มหรือเก็บรักษา และชะลอการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (วันเพ็ญ, 2556) เพื่อให้ได้ไวน์ที่มีคุณภาพดีและมีความคงตัวสูงภายหลังการบรรจุแล้ว

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เตรียมน้ำลิ้นจี่

นำลิ้นจี่พันธุ์ฮงฮวยผลสุกจัดที่จัดหาได้จากอ.พาน จ.เชียงราย เก็บผลในพ.ศ.2557 คว้านและบีบคั้นด้วยเครื่องบีบแยกกากแบบไฮดรอลิก วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ดังนี้ ค่าพีเอช ปริมาณกรดทั้งหมด (เทียบกับกรดซิตริก) โดยวิธีการไทเทรต ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดโดยใช้เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณแอลกอฮอล์โดยใช้เครื่องอีบูลิโอมิเตอร์ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยวิธีเลนและอีนอน ปริมาณไนโตรเจนที่ยีสต์สามารถย่อยได้ (Yeast Assimilable Nitrogen, YAN) โดยวิธีฟอร์มัลไทเทรชัน (Iland *et al*., 2004)

2. เตรียมน้ำหมักสำหรับทำไวน์ลิ้นจี่

ปรับน้ำลิ้นจี่ให้มีปริมาณกรด 1 กรัมต่อลิตร ค่า YAN 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำตาล 220 กรัมต่อลิตร เติมเอนไซม์เพกทิเนส 0.01 กรัมต่อลิตร และยีสต์ *S. cerevesiae* สายพันธุ์การค้า V1116 ร้อยละ 0.03 ของน้ำหมัก ตามลำดับ (ดัดแปลงจากรุ่งเรืองรัตน์และจันจิรา, 2558)

จากนั้นเติมสารป้องกันออกซิเดชันตามปริมาณที่ต้องการศึกษา 2 ชนิด จำนวน 2 ครั้ง คือ ครั้งแรกเติมก่อนการหมัก (KMS 0.06 กรัมต่อลิตร หรือสารผสมของ KMS และกรดแอสคอร์บิก (1:1) 0.12 กรัมต่อลิตร) โดยเฉพาะตัวอย่างที่เติม KMS ให้เติมเบนโทไนท์ 2 ระดับ (0 และ 1 กรัมต่อลิตร) ก่อนนำไปหมักที่ 20 °ซ จนกระทั่งยุติการหมัก จึงเติมสารป้องกันออกซิเดชันที่ต้องการศึกษาเป็นครั้งที่สอง (KMS 0.06 กรัมต่อลิตร หรือสารผสมของ KMS และกรดแอสคอร์บิก (1:1) 0.12 กรัมต่อลิตร) บ่มที่ 16-18 °ซ เป็นเวลา 1 สัปดาห์

จากนั้นเติม PVPP ตามปริมาณที่ต้องการศึกษา (3 ระดับ คือ 0, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร) เป็นเวลา 2 สัปดาห์ แยกส่วนใสใสในขวดใหม่ แล้วปิดทับด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ บ่มเป็นเวลา 1 เดือน นำไปตรวจสอบหาความสามารถในการเกิดสีน้ำตาลในข้อ 4 และบ่มเป็นเวลา 6 เดือน สำหรับตรวจสอบความคงตัวในข้อ 3.1-3.4

วิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างไวน์หลังยุติการหมักเช่นเดียวกับข้อ 1 และเพิ่มเติมอัตราการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างการหมัก โดยการชั่งน้ำหนักขวดหมักทุกวัน คำนวณในรูปของกรัมต่อลิตรต่อวัน (Bely *et al*., 1990)

3. ตรวจสอบความคงตัวของไวน์ลิ้นจี่

นำเฉพาะตัวอย่างไวน์ที่ผ่านการหมักในข้อ 2 เฉพาะตัวอย่างที่เติมสารป้องกันออกซิเดชันด้วย KMS และได้ทำการตกตะกอนด้วยเบนโทไนต์ 2 ระดับ และ PVPP 3 ระดับ ซึ่งผ่านการบ่มเป็นเวลา 6 เดือนแล้วในข้อ 2 รวม 6 สิ่งทดลอง มาทำการตรวจสอบคุณภาพ (Iland *et al*., 2004) ดังนี้

3.1 วัดค่าความขุ่น (Turbidity) โดยนำตัวอย่างไวน์ 10 มิลลิลิตร วัดค่าความขุ่น โดยใช้เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity meter) ทุก 1 เดือน เป็นเวลา 6 เดือน หากผลการทดสอบมีค่าความขุ่นมากกว่า 1 NTU ควรหาสาเหตุความไม่คงตัวในข้อ 3.2 และ 3.3 ต่อไป

3.2 วัดค่าความคงตัวของไวน์ที่อุณหภูมิสูง (Heat stability test) โดยต้มตัวอย่างไวน์ 10 มิลลิลิตร ที่ 70-80 °ซ เป็นเวลา 5 นาที แล้วเก็บที่ 4 °ซ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หากตัวอย่างไม่ตกตะกอน แสดงว่าไวน์มีความคงตัวจากโปรตีน

3.3 การตกตะกอนด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (Alcohol test) เติมแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 95 จำนวน 5 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง หากตัวอย่างไม่มีการตกตะกอน แสดงว่าไวน์มีความคงตัวจากคาร์โบไฮเดรต

3.4 ความคงตัวของไวน์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cold stability test) นำตัวอย่างไวน์ 50 มิลลิลิตร วางที่ 0 °ซ เป็นเวลา 1 วัน แล้วตั้งทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง สังเกตการตกผลึกของโพแทสเซียมไบทาร์เทรต โดยการวัดค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณกรดทั้งหมดก่อนและหลังการวางตัวอย่างไว้ที่ 0 °ซ

4. ตรวจสอบความคงตัวของไวน์จากการเกิดสีน้ำตาล

นำเฉพาะตัวอย่างไวน์ที่ผ่านการหมักและมีการเติมสารป้องกันออกซิเดชัน 2 ชนิด (KMS 0.06 กรัมต่อลิตร และสารผสมของ KMS และกรดแอสคอร์บิก (1:1) 0.12 กรัมต่อลิตร) ร่วมกับการใช้สารตกตะกอนคือเบนโทไนต์ 2 ระดับ (0 และ 1 กรัมต่อลิตร) และ PVPP 3 ระดับ (0, 0.4 และ 0.8 กรัมต่อลิตร) รวม 12 สิ่งทดลอง หลังยุติการหมักแล้วเป็นเวลา 2 สัปดาห์ มาทำการตรวจสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (browning potential) โดยนำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดสอบที่มีฝาปิดสนิท มาปิดทับด้วยก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนตามลำดับ บ่มที่อุ 55 °ซ เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร (Singleton and Kramling, 1997)

5. การวางแผนการทดลอง

ทดสอบคุณภาพทุกสิ่งทดลองจำนวน 3 ซ้ำ วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ ANOVA ที่มีแผนแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) และหาค่าความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองโดยใช้ Duncan's Multiple Range Test (Meilgaard *et al*., 2007)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. คุณภาพน้ำลิ้นจี่

ตัวอย่างน้ำลิ้นจี่พันธุ์ฮงฮวยมีค่าพีเอช 4.13 ปริมาณกรดทั้งหมด 3.53 กรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดร้อยละ 12 น้ำตาลรีดิวซ์ 109.76 กรัมต่อลิตร และค่า YAN 265.07 มิลลิกรัมต่อลิตร (Table 1) ซึ่งมีค่า YAN อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม (ค่า YAN ต่ำสุดควรอยู่ในช่วง 150-200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร) (Bely *et al*., 1990) อย่างไรก็ตาม น้ำลิ้นจี่ยังมีปริมาณกรดที่ค่อนข้างสูง จึงได้ปรับด้วยน้ำให้มีปริมาณกรดเหลือเพียง 1 กรัมต่อลิตร ส่งผลให้น้ำหมักมีค่า YAN ลดลง จึงได้ทำการปรับค่าYAN เป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอต่อการเจริญของยีสต์ในระหว่างการหมัก (ดัดแปลงจากรุ่งเรืองรัตน์และจันจิรา, 2558) คุณภาพไวน์จะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ลิ้นจี่ที่ใช้ในการผลิต เช่น ลิ้นจี่สายพันธุ์ชาฮิ (Shahi) มีค่าพีเอช 4.8 ปริมาณกรดทั้งหมด 4.30 กรัมต่อลิตร และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดร้อยละ 17 น้ำตาลรีดิวซ์ 269 กรัมต่อลิตร (Kumar *et al*., 2008) พันธุ์ฮงฮวย จักรพรรดิ และกิมเจง มีค่าพีเอช 4.51, 4.25 และ 4.76 ปริมาณกรด 3.9, 4.1 และ 2.5 กรัมต่อลิตร และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดร้อยละ 17.93, 18.53 และ 17.87 ตามลำดับ (Rattanapanone and Boonyakiat, 2000)

Table 1 Chemical composition of lychee juice[1] based wine.

Quality	$\bar{X}$	SD[2]
pH	4.13	0.01
TA[3] (g/L)	3.53	0.01
TSS (%)	12.00	0.01
Reducing sugar (g/L)	109.76	0.01
YAN[4] (mg N/L)	265.07	0.01

[1]harvested in 2014,[2]standard and deviation, [3] Titratable acidity (ascitric acid), [4] Yeast Assimilable Nitrogen, N=3

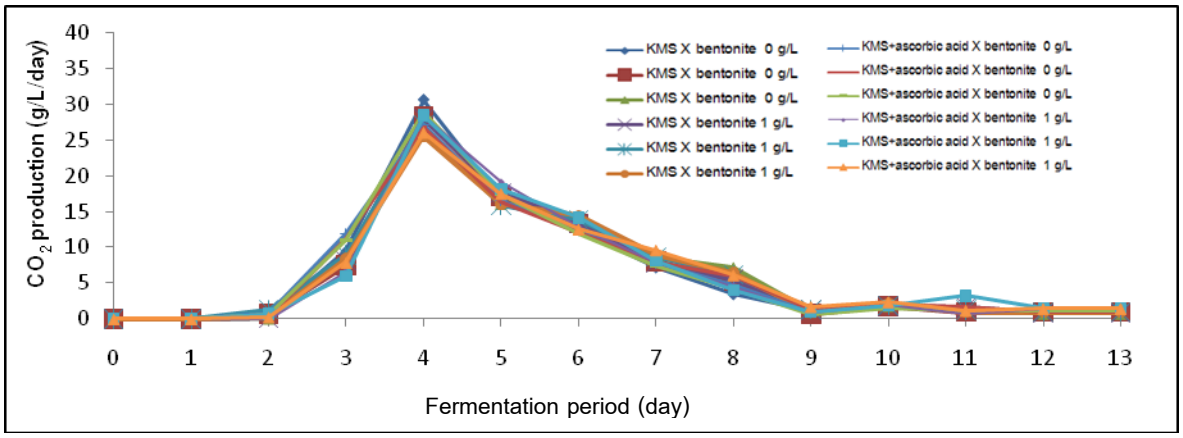


Figure 1 Carbon dioxide production during lychee wine fermentation stabilized with antioxidizing and fining agents.

2. คุณภาพการหมัก

การใช้สารป้องกันการเกิดออกซิเดชันร่วมกับสารช่วยตกตะกอนทุกชนิดไม่มีผลต่ออัตราการสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างการหมัก โดยทุกตัวอย่างมีปริมาณใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 86.17-87.43 กรัมต่อลิตร (Figure1) ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีอัตราการสร้างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และได้

ไวน์ที่มีคุณภาพทางเคมีอยู่ในเกณฑ์ดี (Table 2) มีค่าพีเอช 3.73-3.98 ปริมาณกรด 4.33-4.75 กรัมต่อลิตร ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดร้อยละ 5.40-6.13 และแอลกอฮอล์ร้อยละ 11.00-11.67 (โดยปริมาตร) ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสิ่งทดลอง ($p>0.05$)

3. คุณภาพด้านความคงตัวที่อุณหภูมิสูง

ความไม่คงตัวที่อุณหภูมิสูงมักปรากฏให้เห็นเป็นความขุ่นในไวน์ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างไวน์มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูงอันเนื่องมาจากโปรตีน โดยประเมินจากการที่ไวน์ทุกตัวอย่างไม่มีการตกตะกอนเมื่อให้ความร้อน ตัวอย่างไวน์ที่ใช้เบนโทไนต์และ PVPP เมื่อบ่มไว้เป็นเวลา 6 เดือน ไวน์มีค่าความขุ่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) คืออยู่ในช่วง 1.04-4.32 NTU โดยสูงกว่าค่าที่เหมาะสมเล็กน้อย (1-2 NTU) (Bely *et al*., 1990)

ผลการทดสอบการตกตะกอนด้วยแอลกอฮอล์ พบว่าไวน์มีตะกอนสีขาวแขวนลอยอยู่เล็กน้อย (Table 3) แสดงว่าไวน์ตัวอย่างอาจมีอนุภาคของคาร์โบไฮเดรตอยู่ เมื่อสังเกตค่าความขุ่นของตัวอย่างที่ผ่านการบ่มเป็นระยะเวลา 6 เดือนแล้ว ทุกตัวอย่างมีค่าลดลงหลังจากยุติการหมักอย่างต่อเนื่อง (Figure 2) จาก 13.74-20.35 NTU เป็น 1.04-4.32 NTU ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการวิจัยที่ผ่านมาของรุ่งเรืองรัตน์และจันจิรา (2558) ในไวน์ลิ้นจี่ที่ไม่ได้ผ่านการทำให้คงตัวเมื่อบ่มเป็นเวลา 6 เดือน ไวน์ยังมีค่าความขุ่นสูงอยู่ในช่วง 5.02-8.27 NTU

Table 2 Chemical compositions of lychee wine stabilized with antioxidizing and fining agents.[1]

Antioxidizing agents	Fining agents (g/L)		pH^{ns}	TA (g/L)	TSS (%)	Alcohol^{ns} (% vol.)
	Bentonite	PVPP				
KMS 0.06 g/L	0	0	3.98 ± 0.11	4.65 ± 0.15^{b}	5.93 ± 0.11^{b,c,d}	11.35 ± 0.05
	0	0.4	3.73 ± 0.28	4.73 ± 0.08^{b}	5.67 ± 0.11^{a,b,c}	11.50 ± 0.26
	0	0.8	3.73 ± 0.06	4.71 ± 0.08^{b}	5.87 ± 0.11^{b,c,d}	11.63 ± 0.11
	1	0	3.97 ± 0.02	4.33 ± 0.18^{a}	5.80 ± 0.00^{b,c,d}	11.42 ± 0.32
	1	0.4	3.85 ± 0.03	4.55 ± 0.08^{b}	5.40 ± 0.20^{a}	11.63 ± 0.05
	1	0.8	3.83 ± 0.09	4.66 ± 0.16^{b}	5.73 ± 0.30^{a,b,c}	11.42 ± 0.41
KMS and ascorbic acid (1:1) 0.12 g/L	0	0	3.82 ± 0.18	4.58 ± 0.07^{b}	5.60 ± 0.20^{a,b}	11.63 ± 0.05
	0	0.4	3.76 ± 0.16	4.75 ± 0.04^{b}	5.93 ± 0.30^{b,c,d}	11.67 ± 0.25
	0	0.8	3.81 ± 0.19	4.66 ± 0.14^{b}	5.93 ± 0.11^{b,c,d}	11.53 ± 0.30
	1	0	3.83 ± 0.18	4.66 ± 0.14^{b}	5.93 ± 0.11^{b,c,d}	11.43 ± 0.15
	1	0.4	3.85 ± 0.10	4.75 ± 0.11^{b}	6.00 ± 0.20^{c,d}	11.38 ± 0.02
	1	0.8	3.83 ± 0.09	4.70 ± 0.17^{b}	6.13 ± 0.23^{d}	11.00 ± 0.40

[1]after fermentation, ns in the same row followed by different letters are not significantly different ($p>0.05$)

a, b, c, d in the same row followed by different letters are not significantly different ($p\leq0.05$)

4. คุณภาพด้านความคงตัวที่อุณหภูมิต่ำ

ความไม่คงตัวที่อุณหภูมิต่ำมักปรากฏให้เห็นเป็นผลึกโพแทสเซียมไบทาร์เทรตที่ก้นภาชนะเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นความไม่เสถียรของไวน์ทางด้านกายภาพที่สำคัญที่สุด (Ricardo and Curvelo-garcia, 2006)

ทำการตรวจสอบความคงตัวที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเวลาบ่มผ่านไป 6 เดือน ตัวอย่างไวน์ที่มีการใช้สารให้ความคงตัวแตกต่างกัน มีค่าการนำไฟฟ้าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (Table 4) ตัวอย่างมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1130-1185 µS/cm หลังการทำ cold stability test มีค่าลดลงไม่มากนัก ชี้ให้เห็นว่าไวน์มีความคงตัวอยู่ในระดับปานกลางถึงดี (Guise *et al*., 2014) และอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม (ไวน์ขาวไม่ควรสูงกว่า 1400-1600 µS/cm) (Sophie, 2008) ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงไม่จำเป็นต้องนำไวน์ไปผ่านขั้นตอนการตกผลึกทาร์เทรตก่อนการบรรจุ ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิต

นอกจากนี้หลังการทำ cold stability test ปริมาณกรดของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเหลือ 0.06-0.18 กรัมต่อลิตร (คิดเป็นลดลงร้อยละ 1.27-3.86) ซึ่งในกรณีที่ไวน์มีความเป็นกรดสูง ก็สามารถเพิ่มขั้นตอนการตกผลึกได้เพื่อลดความเป็นกรดของไวน์ นอกจากนี้ยังเป็นผลดีในการเตรียมน้ำหมักให้มีปริมาณกรดสูงขึ้น โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำลิ้นจี่มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ไวน์มีกลิ่นหอมของผลไม้มากขึ้น อย่างไรก็ตามควรพิจารณาร่วมกับปัจจัยอื่น เช่น สายพันธุ์ลิ้นจี่ และปริมาณกรดของน้ำลิ้นจี่ที่จำเป็นต้องปรับก่อนเริ่มทำการหมัก เป็นต้น

Table 3 Heat stability of lychee wine stabilized with fining agents after aging for six months.

Fining agents (g/L)		Heat stability test	Alcohol test	Turbidity^{ns}
Bentonite	PVPP			(NTU)
0	0	n.d.[1]	slightly	4.32 ± 0.90
0	0.4	n.d.	slightly	3.76 ± 2.00
0	0.8	n.d.	slightly	3.65 ± 2.05
1	0	n.d.	slightly	1.57 ± 3.89
1	0.4	n.d.	slightly	1.04 ± 3.56
1	0.8	n.d.	slightly	2.39 ± 0.91

ns in the same row followed by different letters are not significantly different ($p>0.05$)

a, b, c, d in the same row followed by different letters are not significantly different ($p\leq0.05$), [1]not detected

Table 4 Chemical compositions of lychee wine stabilized with fining agents after aging for six months.

Fining agents (g/L)		Cold stability test	Conductivity^{ns} (µS/cm)				ΔTA^{ns}
Bentonite	PVPP		Before	After	ΔT[1]	Stability level[2]	(g/L)
0	0	n.d.[3]	1162.67 ± 23.35	1117.33 ± 4.16	45.33 ± 19.22	good	0.09 ± 0.04
0	0.4	n.d.	1130.00 ± 19.97	1090.67 ± 44.06	39.33 ± 34.93	good	0.14 ± 0.12
0	0.8	n.d.	1158.33 ± 26.65	1107.00 ± 38.15	51.33 ± 44.79	medium	0.06 ± 0.08
1	0	n.d.	1169.33 ± 23.05	1126.67 ± 21.57	42.67 ± 42.71	good	0.13 ± 0.15
1	0.4	n.d.	1185.33 ± 18.14	1144.00 ± 35.38	41.33 ± 17.24	good	0.09 ± 0.11
1	0.8	n.d.	1177.67 ± 7.50	1113.00 ± 24.06	64.67 ± 31.56	medium	0.18 ± 0.12

ns in the same row followed by different letters are not significantly different ($p>0.05$)

[1] difference between before and after cold test, [2]< 30 very good, 30-50 good, 50-70 medium, > 70 low, [3]not detected

5. คุณภาพความคงตัวจากการเกิดสีน้ำตาล

ในระหว่างกระบวนการผลิต การบ่ม และการเก็บบ่มไวน์ขาว มักมีปัญหาการเกิดสีน้ำตาลจากการออกซิเดชันองค์ประกอบต่างๆ ของไวน์จนไม่เป็นที่ยอมรับ จึงจำเป็นต้องมีการใช้สารป้องกันการออกซิเดชันอย่าง

เหมาะสม ทำการประเมินอัตราการเกิดสีน้ำตาลได้โดยวัดปริมาณรงควัตถุสีน้ำตาลในไวน์จากค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร (Iland *et al.*, 2004) พบว่า การใช้สารป้องกันการเกิดออกซิเดชันร่วมกับการใช้สารทำให้คงตัวที่แตกต่างกันมีผลต่ออัตราการเกิดสีน้ำตาลของไวน์ลิ้นจี่ ($p \leq 0.05$) (Table 5) และมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารป้องออกซิเดชันเลย โดยการใช้ KMS ร่วมกับ PVPP 0.4 กรัมต่อลิตร และการใช้สารผสมของ KMS และกรดแอสคอร์บิกร่วมกับเบนโทไนต์ 1 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้อัตราการเกิดสีน้ำตาลของไวน์ลิ้นจี่ต่ำสุดคือ 0.772 และ 0.804 ตามลำดับ ซึ่ง KMS และกรดแอสคอร์บิกมีคุณสมบัติในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันในไวน์ นอกจากนี้กรดแอสคอร์บิกยังช่วยรักษากลิ่นของผลไม้ และมีความไวต่อการป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่า KMS (Wilkes, 2011) พบว่าตัวอย่างไวน์มีค่าการเกิดสีน้ำตาลสูงกว่าไวน์ขาวที่ผลิตในเขตวินโฮเวอร์เดอ (Vinho Verde) และดูโร (Douro) ของประเทศโปรตุเกส เมื่อเติมคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส กัมอารบิก กรดเมแททาร์ทาริก และแมนโนโปรตีน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.002-0.061 (Guise *et al.*, 2014)

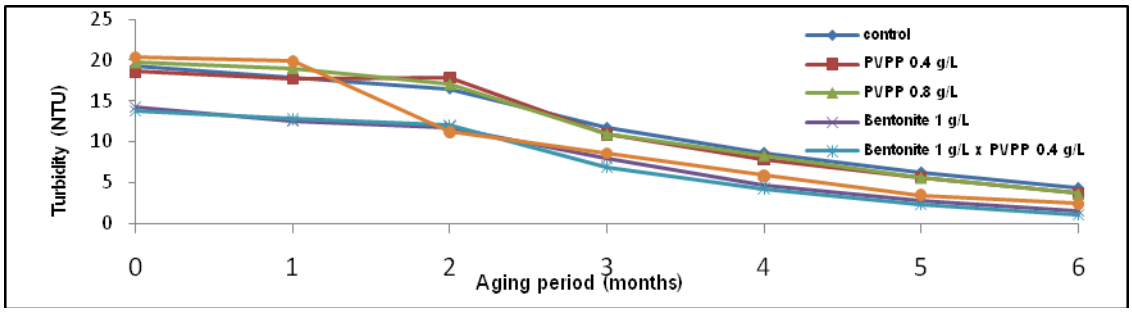


Figure 2 Turbidity of lychee wine stabilized with fining agents after aging for six months.

Table 5 Browning potential of lychee wine stabilized with antioxidizing and fining agents after aging for six months.

Antioxidizing agents	Fining agents (g/L)		Browning potential
	Bentonite	PVPP	
KMS 0.06 g/L	0	0	0.901 ± 0.07^{e}
	0	0.4	0.772 ± 0.03^{a}
	0	0.8	$0.833 \pm 0.02^{b,c,d}$
	1	-	$0.881 \pm 0.02^{d,e}$
	1	0.4	$0.824 \pm 0.01^{b,c}$
	1	0.8	$0.865 \pm 0.002^{c,d,e}$
KMS and ascorbic acid (1:1) 0.12 g/L	0	0	$0.836 \pm 0.005^{b,c,d}$
	0	0.4	$0.843 \pm 0.01^{b,c,d}$
	0	0.8	$0.832 \pm 0.0005^{b,c,d}$
	1	0	$0.804 \pm 0.001^{a,b}$
	1	0.4	$0.854 \pm 0.002^{c,d}$
	1	0.8	$0.836 \pm 0.005^{b,c,d}$

ns in the same row followed by different letter are not significantly different ($p>0.05$)

a, b, c, d in the same row followed by different letter are not significantly different ($p \leq 0.05$)

สรุป

ไวน์ลิ้นจี่มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง โดยประเมินจากตัวอย่างไม่มีการตกตะกอนของโปรตีนจากการทำ heat stability test แต่ยังมีตะกอนของคาร์โบไฮเดรตอยู่เล็กน้อยโดยประเมินจาก alcohol test ไวน์ยังมีค่าความขุ่นสูงกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสม ไวน์ยังมีความคงตัวที่อุณหภูมิต่ำอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี โดยประเมินจากไม่มีการตกผลึกของโพแทสเซียมไบทาร์เทรตจากการทำ cold stability test และมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไม่มาก การใช้ KMS ร่วมกับ PVPP 0.4 กรัมต่อลิตร และการใช้สารผสมของ KMS และกรดแอสคอร์บิกร่วมกับเบนโทไนต์ 1 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้อัตราการเกิดสีน้ำตาลของไวน์ต่ำสุด ซึ่งควรทำการวิจัยต่อเนื่องในด้านระยะเวลาการบ่มที่ทำให้ไวน์มีค่าความขุ่นอยู่ในเกณฑ์เหมาะสม และผลกระทบต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาที่สนับสนุนทุนวิจัยประจำปี 2558

เอกสารอ้างอิง

รุ่งเรืองรัตน์ และจันจิรา. 2558. **สายพันธุ์ยีสต์และปริมาณไนโตรเจนที่ยีสต์สามารถใช้ได้ เหมาะสมต่อการหมักไวน์ลิ้นจี่**. ปัญหาพิเศษ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง. 75 น.

วันเพ็ญ จิตรเจริญ. 2556. **คู่มือไวน์เมกเกอร์**. สำนักพิมพ์บริษัทเชียงใหม่พริ้นท์ติ้งจำกัด, เชียงใหม่. 324 น.

Bely, M., J.M. Sablayrolles and P. Barre. 1990. Description of alcoholic fermentation kinetics: its variability and significance. **American Journal of Enology and Viticulture** 41: 319-324.

Guise, R., L. Filipe-Ribeiro., D. Nascimento, O. Bessa and F.M. Nunes. 2014. Comparison between different types of carboxylmethylcellulose and other oenological additives used for white wine tartaric stabilization. **Food Chemistry** pp. 250-257.

Iland, P.N., G. Bruce, S. Edwards and E. Wilkes. 2004. **Chemical Analysis of Grapes and Wine: Techniques and Concepts.** Patrick Iland Wine Promotions Pty ltd. 110 p.

Kumar, K.K., R. Manas and H. Smita. 2008. Fermentation of Litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) Fruits into Wine. *In* A. Jaime and T. da Silva (eds). **Food**. Global Science Books, pp. 43-47.

Meilgaard, M., B. Gail, V. Civille and T. Carr. 2007. **Sensory Evaluation Techniques.** Taylor and Francis. 448 p.

Rattanapanone, N. and D. Boonyakiat. 2000. Effect of packaging materials on shelf life and physico-chemical changes during storage of lychee fruit. *In* **Proceeding of 4th International Conference on Postharvest Science** 2: 611-612.

Ricardo da-silva, J.M. and A.S. Curvelo-garcia. 2006. **Use of ion exchange resins for tartrate wine stabilization**. Vigne et Vin Publications Internationales, pp. 223-246.

Singleton, V.L. and T.E. Kramling. 1997. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture** 144-158.

Sophie, S. 2008. **Wine a winner in alcohol-cancer link study**. Australian Broadcasting Corporation 165-168.

Wilkes, E. 2011. **Wine Analytical Services**. The Pennsylvania State University. 34-48.

ผลของสารสกัดจากสาหร่ายผมนางต่อคุณลักษณะของไส้กรอกปลาอิมัลชัน

Effect of *Gracilaria fisheri* Extract on Characteristics of Fish Emulsion Sausage

ภัทิรา สุดเลิศ[1] และ วรางคณา สมพงษ์[1*]

Phatthira Sutloet[1] and Warankana Sompongse[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการใช้สารสกัดจากสาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*) เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกปลาอิมัลชัน การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ โดยพบว่าการสกัดสาหร่ายผมนางที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 60 นาที ทำให้สารสกัดมีค่าความแข็งแรงของเจล และค่าความสว่าง (L*) มากที่สุด ($p \leq 0.05$) แต่มีค่า % syneresis น้อยที่สุด จากนั้นนำสารสกัดจากสาหร่ายที่มีเส้นใยของสาหร่ายเติมในไส้กรอกปลาอิมัลชันที่ผลิตจากซูริมิปลาฤาษี (*Mulloidichthys martinicus*) เกรด AA และซูริมิปลาทรายแดง (*Nemipterus hexodon*) เกรด FA ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักแป้งมัน ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินผล ได้แก่ ค่าสี ค่าความคงตัวอิมัลชัน ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุก และค่าทางลักษณะเนื้อสัมผัส จากผลการทดลอง พบว่า การเติมสารสกัดร้อยละ 50 ในไส้กรอกจากซูริมิปลาฤาษี ทำให้ค่า cohesiveness, gumminess และ chewiness สูงที่สุด ขณะที่การเติมสารสกัดร้อยละ 25 ในไส้กรอกจากซูริมิปลาทรายแดง ค่าทางลักษณะเนื้อสัมผัสทุกค่า ได้แก่ hardness, cohesiveness, gumminess และ chewiness ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$)

ABSTRACT

The objective of this research was to use seaweed extract from *Gracilaria fisheri* to improve the textural properties of fish emulsion sausage. Study on the optimum conditions for extraction of seaweed showed that temperature and heating time had affected the physical properties of the seaweed extract. The extraction at 121°C for 60 min, showed the highest in gel strength and lightness (L*) ($p \leq 0.05$), but the lowest in % syneresis. Then, the seaweed extract (solid gel with traces of seaweed fibrous) was added to emulsion sausage from the goatfish (*Mulloidichthys martinicus*) AA grade and threadfin bream (*Nemipterus hexodon*) FA grade surimi at 0, 25, 50, 75 and 100 % (w/w of tapioca starch). The evaluation's parameters were color, emulsion stability, cooking loss and textural properties. From the result, addition of 50% seaweed extract in goatfish surimi had the highest in cohesiveness, gumminess and chewiness. Addition of 25 % seaweed extract in threadfin bream surimi did not significant difference in all of the textural parameters: hardness, cohesiveness, gumminess and chewiness ($p > 0.05$), comparing with its control.

Key Words: seaweed extract, *Gracilaria fisheri*, fish emulsion sausage, goatfish surimi, threadfin beam surimi

* Corresponding author; e-mail address: **wsompongse@hotmail.com**

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani 12120

คำนำ

ประเทศไทยมีการผลิตสาหร่ายบริโภคได้เป็นจำนวนมาก มีการส่งออกสาหร่ายทะเลเป็นสินค้าออกประมาณปีละ 20 - 200 ตัน โดยน้ำหนักแห้ง คิดเป็นมูลค่าไม่ต่ำกว่า 4 - 10 ล้านบาท มีการนำสาหร่ายบริโภคได้มาใช้งานในหลายด้าน ได้แก่ การใช้เป็นอาหารมนุษย์ อาหารสัตว์ อุตสาหกรรมยา รวมถึงเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ เช่น อัลจิเนตจากสาหร่าย sea spaghetti เฟอเซลลาแรนจากสาหร่ายสายใบ คาร์ราจีแนนจากสาหร่ายโพรง และวุ้นจากสาหร่ายผมนาง ด้วยสมบัติของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่เมื่อละลายหรือกระจายตัวในน้ำจะทำให้สารที่ได้มีความหนืดสูงหรือมีลักษณะเป็นเจล (นิธิยา, 2551) จึงทำให้สารไฮโดร-คอลลอยด์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอาหาร โดยเฉพาะกลุ่มของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์

การผลิตผลิตภัณฑ์โปรตีนเจลจากเนื้อปลา ชนิดและคุณภาพวัตถุดิบมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากส่งผลต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ จึงได้มีผู้วิจัยพยายามหาแนวทางในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการต่างๆ รวมทั้งการเติมสารไฮโดรคอลลอยด์ (Farouk *et al*., 2011; Chen *et al*., 2007) นอกจากนี้ ด้วยคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของ dietary fiber ที่เป็นองค์ประกอบของสาหร่าย ซึ่งช่วยในการจับน้ำและไขมัน (Thebaudin *et al*., 1997) จึงช่วยปรับปรุงสมบัติในการเกิดอิมัลชันและการเกิดเจลของผลิตภัณฑ์ เช่น การเติมสาหร่าย Sea Spaghetti (*Himanthalia elongata*) ในส่วนผสมมวลเหนียวของเนื้อหมู (Fernández - Martín *et al*., 2009) และสาหร่าย Wakame (*Undaria pinnatifida*) ในแพตตี้เนื้อวัว (López-López *et al*., 2010) แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีข้อมูลการศึกษาการเติมสารสกัดจากสาหร่ายผมนางรวมถึงกากสาหร่ายที่เป็น dietary fiber ในระบบเจลโปรตีนจากเนื้อปลา

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารสกัดจากสาหร่ายผมนาง และใช้สารสกัดจากสาหร่ายที่มี dietary fiber เป็นส่วนประกอบในการผลิตไส้กรอกปลาอิมัลชัน โดยมีการแทนที่สารสกัดจากสาหร่ายในส่วนของแป้งมัน เนื้อปลาที่เลือกใช้ ได้แก่ ซูริมิปลาฤาษีเกรด AA และซูริมิปลาทรายแดงเกรด FA ทำการประเมินผลโดยการวัดค่าสี ความคงตัวของอิมัลชัน (emulsion stability) การสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุก (% cooking loss) และลักษณะทางเนื้อสัมผัส

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารสกัดจากสาหร่าย

ทำความสะอาดสาหร่ายผมนางสดที่ได้จากศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งตราด กรมประมง อบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยมีความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 12 ศึกษาเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารสกัดจากสาหร่ายโดยใช้น้ำกลั่น 3 สภาวะ ได้แก่ การให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง การใช้หม้อนึ่งความดันที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 และ 60 นาที เตรียมสารสกัดจากสาหร่าย ตามวิธีการของภัทิรา และ วรางคณา (2557) เพื่อนำไปวัดค่าทางกายภาพ

การวัดค่าทางกายภาพของสารสกัดจากสาหร่าย

1) ปริมาณผลผลิต (% yield)

คำนวณเปรียบเทียบสารสกัดกับสาหร่ายแห้งก่อนการสกัดที่เติมน้ำกลั่นในอัตราส่วนสาหร่ายต่อน้ำ 1:30 โดย % yield = [น้ำหนักสารสกัดจากสาหร่าย (g) - น้ำหนักสาหร่ายแห้ง (g)] x 100 ÷ น้ำหนักสาหร่ายแห้ง (g)]

2) ค่าสี

วัดค่าสี (L*a*b*) ของสารสกัดที่แข็งตัว โดยใช้เครื่องวัดสี HunterLab รุ่น ColorFlex CX2687

3) ความแข็งแรงของเจล

วัดความแข็งแรงของเจล (gel strength) ของสารสกัดที่แข็งตัวด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส รุ่น TA-XTPlus (Stable Micro Systems, Surrey, UK) โดยใช้หัววัด cylinder probe (P/10) ตามวิธีการของภัทิรา และวรางคณา (2557)

4) สมบัติด้าน freeze - thaw stability

วัดสมบัติด้าน freeze - thaw stability ตามวิธีการของ Kuar *et al*. (2004)

การผลิตไส้กรอกปลาอิมัลชัน

1) การเตรียมสารสกัดจากสาหร่าย

เตรียมสารสกัดจากสาหร่ายตามสภาวะการสกัดที่ดีที่สุดจากผลการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งไม่มีการกรองกากออก สารสกัดที่ได้จึงมีลักษณะเป็นเจลที่มีเส้นใยของสาหร่าย นำสารสกัดดังกล่าวมาเติมในไส้กรอกอิมัลชัน

2) การเตรียมไส้กรอกอิมัลชัน

นำซูริมิมาละลายที่ 4°C และหั่นให้มีขนาด 1 cm^3 จากนั้นนำมาสับผสมด้วยเครื่องสับผสม (รุ่น LR - QS - 3LA ยี่ห้อกล้วยน้ำไท ประเทศไทย) โดยแปรปริมาณของสารสกัดเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม มีแป้งมันร้อยละ 3 โดยน้ำหนักทั้งหมด) 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักแป้งมัน จากนั้นเติมเกลือ พริกไทย ร้อยละ 2.5 และ 0.2 ตามลำดับ และเติมน้ำแข็งครึ่งหนึ่ง จากนั้นเติมน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่เย็นจนได้อุณหภูมิ 4°C แป้งมันและน้ำแข็งส่วนที่เหลือทั้งหมด สับผสมจนส่วนผสมเข้ากันดี และอัดส่วนผสมมวลเหนียวใส่ไส้เซลลูโลส ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 mm ต้มตัวอย่างในน้ำอุณหภูมิ 70 - 75°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาแช่ในน้ำอุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 10 นาที เก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 1 คืน ก่อนนำไปทดสอบทางกายภาพ

การประเมินผลทางกายภาพ

1) ค่าสี

ตัดตัวอย่างสูง 25 mm และนำมาวัดค่าสี (L* a* b*) โดยใช้เครื่องวัดสีเช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1

2) ค่าความคงตัวของอิมัลชัน (Emulsion Stability)

วัดค่าความคงตัวของอิมัลชันตามวิธีการของ Lureana – Martinez *et al*. (2004)

3) ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุก (% Cooking loss)

ชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการปรุงสุกของตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมมวลเหนียว โดยค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุก แสดงเป็นร้อยละของน้ำหนักเริ่มต้น (Lopez-Lopez *et al*., 2010)

4) ค่าทางลักษณะเนื้อสัมผัส

ตัดตัวอย่างสูง 25 mm และนำมาวัดค่าทางลักษณะทางเนื้อสัมผัสด้วยวิธี TPA (Texture Profile Analysis) ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส โดยใช้หัววัด cylinder P50 โดยตั้งค่าการกดเป็นระยะทางร้อยละ 40 ของความสูงในการกดสองครั้ง ด้วยความเร็วคงที่ 5 mm/s

สถิติที่ใช้ในการประเมินผล

วางแผนการทดลองแบบ complete randomized design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (analysis of variance) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารสกัดจากสาหร่าย

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายผมนางที่ใช้ในการทดลอง มีปริมาณความชื้น ร้อยละ 8.88 โปรตีน ร้อยละ 13.31 ไขมัน ร้อยละ 0.13 เถ้า ร้อยละ 30.67 และเส้นใย ร้อยละ 3.77 จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารสกัดจากสาหร่ายผมนาง พบว่า การสกัดที่อุณหภูมิ 121°C ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของเจลสูงกว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเมื่อมีการเพิ่มระยะเวลาในการสกัดโดยใช้หม้อนึ่งความดัน เป็นเวลา 60 นาที พบว่า สารสกัดจากสาหร่ายผมนางมีค่าความแข็งแรงของเจลสูงที่สุด ($p > 0.05$) เท่ากับ 1066.37 ± 91.56 g.cm ดังแสดงใน Table 1 เนื่องจากการใช้ หม้อนึ่งความดันเป็นการสกัดภายใต้ความร้อนสูง ในระยะเวลาสั้น ซึ่งเหมาะกับสาหร่ายที่มีความแข็ง (Rigid-type seaweed) อย่างสาหร่ายผมนาง (จักรินทร์ และ จิราพร, 2552) เมื่อพิจารณาค่าสี (L* a* b*) พบว่า ค่าความสว่าง (L*) ค่าสีเขียว (-a*) และค่าสีเหลือง (b*) มีค่าสูงที่สุดในสารสกัดที่ได้จากการสกัดที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 60 นาที โดยค่าสีเขียวที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการใช้ความดันส่งผลให้เม็ดสีภายในเซลล์สาหร่ายถูกทำลาย จึงเกิดการละลายออกมากับสารสกัด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า % syneresis ซึ่งบ่งบอกถึงความคงทนของสารสกัดหลังผ่านการแช่เยือกแข็งและการละลาย พบว่า การใช้หม้อนึ่งความดันส่งผลให้มีค่า % syneresis ที่น้อยกว่า (Table 1) ทั้งนี้เนื่องจากการสกัดภายใต้ความดันสูงในระยะเวลาสั้นส่งผลให้เซลล์ของสาหร่ายถูกทำลายมากกว่าการสกัดด้วยน้ำร้อน จึงได้ปริมาณเนื้อสารที่มากกว่า ส่งผลให้เจลของสารสกัดมีความแข็งแรงมากกว่า

Table 1 Gel strength, color, % syneresis and % yield of seaweed extracts from *Gracilaria fisheri*.

Physical properties	Incubating in water bath at 90°C for 1 h	Autoclaving at 121°C for 30 min	Autoclaving at 121°C for 60 min
Gel strength (g.cm)	193.47^{c} ± 75.74	827.53^{b} ± 264.81	1066.37^{a} ± 91.56
L*	9.25^{b} ± 4.67	15.56^{a} ± 2.67	15.75^{a} ± 1.61
a*	-0.16^{b} ± 0.55	-1.05^{a} ± 0.32	-1.42^{a} ± 0.34
b*	1.37^{c} ± 1.06	3.63^{b} ± 1.33	5.27^{a} ± 0.31
Syneresis (%)	93.63	84.90	83.00
Yield (%) ^{ns}	65.95 ± 7.73	71.02 ± 3.57	70.69 ± 1.71

% Syneresis are values after repeating eight cycles of freezing and thawing.

$^{a-c}$Different letters in the same row of each physical qualities represent significant differences ($p < 0.05$).

^{ns} mean of all treatments in the row are not significantly different ($p > 0.05$).

ผลการศึกษาปริมาณของสารสกัดจากสาหร่ายที่เหมาะสมในการผลิตไส้กรอกปลาอิมัลชัน

1) ค่าสี (L*a*b*)

จากการศึกษาค่าสีของไส้กรอกปลาอิมัลชัน พบว่า การเติมสารสกัดจากสาหร่ายในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าความสว่าง (L*) และค่าสีแดง (a*) ลดลง โดยการเติมร้อยละ 100 ของน้ำหนักแป้งมัน มีค่า L* และ a* น้อยที่สุด เนื่องจากกากสาหร่ายผมนางมีสีเขียว เมื่อพิจารณาตัวอย่างไส้กรอกจากซูริมิปลาฤาษีเทียบกับปลาทรายแดง พบว่า ไส้กรอกจากซูริมิปลาฤาษี มีค่าความสว่าง (L*) น้อยกว่า แต่มีค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) มากกว่า เนื่องจากซูริมิที่ผลิตจากปลาฤาษีนั้นมีสีค่อนข้างแดง และเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารสกัด พบว่า ไม่ส่งผล

ต่อค่าสีเหลือง (b*) ในไส้กรอกจากซูริมิปลาฤาษี แต่ค่าสีเหลือง (b*) ของไส้กรอกจากซูริมิปลาทรายแดงมีค่าลดลง เนื่องจากซูริมิปลาทรายแดงมีสีที่ขาวมากกว่า เมื่อมีปริมาณของกากสาหร่ายที่มีสีเขียวเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีค่าสีเหลืองที่ลดลงมากกว่า

2) ค่าความคงตัวของอิมัลชัน (Emulsion Stability)

ค่าความคงตัวของอิมัลชัน (emulsion stability) แสดงผลด้วย % TEF (total expressible fluid) กล่าวคือ ถ้าตัวอย่างมีค่า % TEF น้อย แสดงว่าตัวอย่างมีความคงตัวของอิมัลชันสูง จากผลการทดลอง พบว่า การเติมสารสกัดจากสาหร่ายผมนางที่ทุกระดับในไส้กรอกจากซูริมิปลาฤาษี ส่งผลให้มีค่าความคงตัวของอิมัลชันไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ผลิตจากซูริมิจากปลาทรายแดง อาจเนื่องจากสารสกัดจากสาหร่ายที่ประกอบด้วยสารสกัดไฮโดรคอลลอยด์ประเภทวุ้นและกากสาหร่ายที่เป็น dietary fiber อาจทำหน้าที่ได้เทียบเท่ากับแป้งมันที่ถูกลดปริมาณลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยของไส้กรอกจากซูริมิปลาฤาษีที่มีการเติมสารสกัดร้อยละ 50 และไส้กรอกปลาทรายแดงที่มีการเติมสารสกัดร้อยละ 25 พบว่ามีปริมาณเส้นใยสูงกว่าสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ (ไม่ได้แสดงข้อมูล) เนื่องจากสารสกัดไฮโดร-คอลลอยด์เป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymer) (Burey *et al.*, 2008) เมื่อถูกเติมเข้าไปในระบบ สารสกัดไฮโดรคอลลอยด์จึงเข้าไปช่วยจับน้ำภายในโครงสร้าง โดยทำหน้าที่เป็นเหมือนสารเติมเต็ม (filler) อีกทั้งสมบัติเชิงหน้าที่ของ dietary fiber ซึ่งโดยทั่วไปมีความสามารถในการจับน้ำและไขมัน (Cofrades *et al.*, 2008) จึงช่วยลดปริมาณน้ำของร่างแหและเพิ่มความหนาแน่นของสิ่งแวดล้อมรอบ protein matrix ทำให้สามารถอุ้มน้ำและไขมันของระบบไว้ได้

Table 2 Color (L* a* b*), % TEF and % cooking loss of emulsion sausage with seaweed extract

	Physical Properties	Mean ± Standard deviation				
		Seaweed extracts (%w/w of tapioca starch)				
		control	25	50	75	100
Goat-fish surimi	L*	$67.96^{a} \pm 0.71$	$67.63^{a} \pm 1.30$	$67.95^{a} \pm 1.10$	$67.77^{a} \pm 0.88$	$66.74^{b} \pm 0.78$
	a*	$3.06^{a} \pm 0.14$	$3.01^{a} \pm 0.20$	$2.85^{b} \pm 0.23$	$2.81^{bc} \pm 0.20$	$2.68^{c} \pm 0.21$
	b*^{ns}	13.19 ± 0.42	13.22 ± 0.24	13.22 ± 0.24	13.31 ± 0.27	13.46 ± 0.36
	TEF (%)^{ns}	0.40 ± 0.14	0.52 ± 0.19	0.56 ± 0.24	0.48 ± 0.31	0.42 ± 0.26
	Cooking loss (%)^{ns}	2.83 ± 0.58	3.07 ± 0.60	2.85 ± 1.91	2.97 ± 0.96	3.05 ± 0.91
Thread fin beam surimi	L*	$69.17^{a} \pm 0.90$	$69.04^{a} \pm 0.99$	$69.10^{a} \pm 0.70$	$68.52^{ab} \pm 0.78$	$68.34^{b} \pm 0.73$
	a*	$1.59^{a} \pm 0.11$	$1.47^{b} \pm 0.11$	$1.32^{c} \pm 0.13$	$1.16^{d} \pm 0.08$	$1.16^{d} \pm 0.08$
	b*	$12.43^{a} \pm 0.27$	$12.39^{a} \pm 0.22$	$12.18^{b} \pm 0.18$	$12.14^{b} \pm 0.22$	$12.31^{ab} \pm 0.29$
	TEF (%)^{ns}	0.434 ± 0.19	0.426 ± 0.14	0.430 ± 0.18	0.408 ± 0.17	0.301 ± 0.22
	Cooking loss (%)	$2.27^{ab} \pm 0.66$	$2.15^{b} \pm 0.83$	$3.14^{a} \pm 0.26$	$3.04^{a} \pm 0.85$	$2.90^{ab} \pm 0.72$

$^{a-c}$ Different letters in the same row of each physical qualities represent significant differences ($p < 0.05$).

^{ns} mean of all treatments in the row are not significantly different ($p > 0.05$).

3) ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุก (% Cooking loss)

จากผลการทดลองดังแสดงใน Table 2 พบว่า การเติมสารสกัดจากสาหร่ายผมนางส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุกไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในทุกตัวอย่าง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าความคงตัวของอิมัลชัน พบว่า ตัวอย่างที่มีการเติมสารสกัดจากสาหร่ายให้ผลไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมสอดคล้องกัน อาจเนื่องจากโครงสร้างของตัวอย่างที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารสกัดจากสาหร่ายสามารถจับน้ำไว้ได้ภายในระบบ โดยพิจารณาจากในขั้นตอนการวัดค่าความคงตัวของอิมัลชัน ส่วนผสมที่ถูกนำไปปั่นเหวี่ยงก่อนได้รับความร้อนนั้น ไม่เกิดการสูญเสียน้ำออกมา นั่นคือ ตัวอย่างมีความคงตัวของอิมัลชันจึงทำให้ไม่มีการเพิ่มขึ้นของค่าสูญเสียน้ำหนักหลังการปรุงสุก

Table 3 Textural properties of emulsion sausage from goatfish surimi with seaweed extract

Textural properties	Mean ± Standard deviation				
	Seaweed extracts (%w/w of tapioca starch)				
	control	25	50	75	100
hardness (g) [ns]	1258.09 ± 171.29	1275.80 ± 350.59	1327.30 ± 271.79	1258.48 ± 162.42	1109.39 ± 94.78
cohesiveness	0.721^{a} ± 0.02	0.702^{b} ± 0.03	0.727^{a} ± 0.02	0.715^{ab} ± 0.01	0.683^{c} ± 0.02
gumminess (g)	902.72^{a} ± 113.96	903.89^{a} ± 284.74	968.97^{a} ± 215.54	898.70^{a} ± 124.32	756.77^{b}± 56.71
chewiness (g)	842.08^{a} ± 111.83	847.44^{a} ± 269.54	912.11^{a} ± 208.95	840.40^{a}± 120.91	708.27^{b} ± 54.47

[a-c] Different letters in the same row of each physical qualities represent significant differences ($p < 0.05$).

[ns] mean of all treatments in the row are not significantly different ($p > 0.05$)

Table 4 Textural properties of emulsion sausage from threadfin beam surimi with seaweed extract

Textural properties	Mean ± Standard deviation				
	Seaweed extracts (%w/w of tapioca starch)				
	control	25	50	75	100
hardness (g)	2292.93^{a}± 470.14	2255.98^{a} ± 548.21	1949.09^{b} ± 336.49	1784.67^{bc} ± 279.38	1614.65^{c}± 273.92
cohesiveness	0.737^{a} ± 0.04	0.736^{a} ± 0.04	0.725^{ab} ± 0.03	0.715^{ab} ± 0.06	0.691^{b} ± 0.05
gumminess (g)	1690.59^{a} ± 367.11	1663.17^{a} ± 437.50	1410.01^{b} ± 218.67	1283.93^{bc} ± 262.66	1116.53^{c}± 203.09
chewiness (g)	1620.59^{a} ± 367.11	1550.88^{a} ± 415.92	1320.53^{b} ± 218.78	1207.84^{bc} ± 271.17	1050.05^{c}± 200.89

[a-c] Different letters in the same row of each physical qualities represent significant differences ($p < 0.05$).

4) ค่าทางลักษณะเนื้อสัมผัส

จากการวัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธี TPA ใน Table 3 พบว่า การเติมสารสกัดจากสาหร่ายผมนางส่งผลให้ตัวอย่างจากซูริมิปลาฤาษีมีค่า hardness ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ขณะที่การเติมสารสกัดร้อยละ 50 ของน้ำหนักแป้งมัน ส่งผลให้ค่า cohesiveness, gumminess และ chewiness มีค่าสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสแบบ 9 – point hedonic scale ในด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมที่มีคะแนนการทดสอบมากกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ไม่ได้แสดงข้อมูล) เนื่องจาก ซูริมิปลาฤาษีมีความแข็งแรงของโครงสร้างตาข่ายโปรตีนน้อยกว่าซูริมิจากปลาทรายแดง จึงอาจทำให้สารสกัดจากสาหร่ายเข้าไปเป็นสารเติมเต็มและช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างได้ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า ไส้กรอกจากซูริมิปลาฤาษีที่มีการเติมสารสกัดจากสาหร่ายผมนางร้อยละ 50 มีปริมาณเส้นใยสูงกว่าสูตรควบคุม 2 เท่าอย่างมีนัยสำคัญ (ไม่ได้แสดงข้อมูล) สารสกัดจากสาหร่ายประกอบด้วยกากสาหร่ายที่เป็น dietary fiber ที่ละลายน้ำไม่ได้ จึงอาจช่วยเพิ่มความหนืดของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์โดยการเกิดตาข่าย 3 มิติที่ละลายไม่ได้ ส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของอาหารด้านสมบัติในการจับน้ำและการพองตัว (Thebuadin *et al*., 1997) ทำให้เกิดโครงสร้างของเจลโปรตีนที่แข็งแรงขึ้น (Backer and Noll, 1998) และความคงตัวของอิมัลชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

สำหรับไส้กรอกจากซูริมิปลาทรายแดง พบว่า การเติมสารสกัดจากสาหร่ายผมนางมากกว่าร้อยละ 25 ของน้ำหนักแป้งมัน ส่งผลให้ค่า hardness, gumminess และ chewiness น้อยกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากซูริมิที่ผลิตจากปลาทรายแดงเป็นซูริมิที่มีโปรตีนคุณภาพดีเมื่อเปรียบเทียบกับซูริมิจากปลาฤาษี ทำให้การเติมสารสกัดซึ่งประกอบด้วยกากสาหร่ายนั้น อาจรบกวนความแข็งแรงของโครงสร้างตาข่ายโปรตีน อีกทั้งการเติมแทนที่แป้งมัน ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงแห้งและมีสมบัติในการดูดน้ำ จึงส่งผลให้โครงสร้างของเจลซูริมิยังคงมีปริมาณความชื้นในระบบ รวมถึงโครงสร้างของตัวอย่างที่ต้องอุ้มไขมันในระบบด้วย จึงอาจทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงน้อยลง ไม่สามารถพยุงโครงสร้างตาข่ายของโปรตีนไว้ได้ ด้วยเหตุนี้ การเติมสารสกัดจากสาหร่ายผมนางในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ตัวแปรทางลักษณะเนื้อสัมผัสที่วัดได้มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสแบบ 9 – point hedonic scale ในด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมที่มีคะแนนการทดสอบน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ไม่ได้แสดงข้อมูล) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า ไส้กรอกจากซูริมิปลาทรายแดงที่มีการเติมสารสกัดจากสาหร่ายผมนางร้อยละ 50 มีปริมาณเส้นใยสูงกว่าสูตรควบคุม 2 เท่าอย่างมีนัยสำคัญ (ไม่ได้แสดงข้อมูล)

สรุป

สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารสกัดจากสาหร่ายผมนาง (*Gracilaria fisheri*) คือ การใช้หม้อนึ่งความดันที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่สารสกัดมีค่าความแข็งแรงของเจล (gel strength) สูงที่สุด และมี % syneresis น้อยที่สุด และปริมาณสารสกัดจากสาหร่ายผมนางที่เหมาะสมในการผลิตไส้กรอกปลาจากซูริมิปลาฤาษี คือ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักแป้งมัน ส่วนปริมาณสารสกัดจากสาหร่ายผมนางที่เหมาะสมในการผลิตไส้กรอกปลาจากซูริมิปลาทรายแดง คือ ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักแป้งมัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2555 ในการสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

จักรินทร์ ตรีอินทอง และ จิราพร รุ่งเลิศเกรียงไกร. 2552. ผลของการแช่อะซิโตนและสภาวะการให้ความร้อนต่อปริมาณผลผลิตและสมบัติของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่สกัดจากสาหร่ายผมนาง (*Gracilaria* sp.) และสาหร่ายโพรง (*Solieria robusta*), น. 228-235. *ใน* **รายงานการประชุมทางวิชาการครั้งที่ 49 (สาขาประมง)**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2551. **เคมีอาหาร**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ภัทิรา สุดเลิศ และ วรางคณา สมพงษ์. 2557. การใช้สารสกัดจากสาหร่ายโพรงในผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นปลา. **ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** 22: 67-78.

Backers, T. and Noll, B. 1998. Dietary fibres move into meat processing. **Fleischwirtschaft** 78: 316-320.

Burey, P., Bhandari, B.R., Howes, T. and Gidley, M.J. 2008. Hydrocolloid Gel Particles: Formation, Characterization, and Application. **Tailor & Francis Online** 48: 361-377.

Chen, H.H., Xu, S.Y. and Wang, Z. 2007. Interaction between flaxseed gum and meat protein. **J of Food Eng** 80: 1051-1059.

Cofrades, S., Lopez-Lopez, I., Solas, M. T., Bravo, L. and Jimenez-Colmenero, F. 2008. Influence of different types and proportions of added edible seaweeds on characteristics of low-salt gel/emulsion meat systems. **Meat Sci** 79: 767-776.

Farouk, M.M., Frost, D.A., Krsinic, G. and Wu, G. 2011. Phase behaviour, rheology and microstructure of mixture of meat proteins and kappa and iota carrageenans. **Food Hydrocolloid** 25: 1627-1636.

Fernández-Martín, F., López-López, I., Cofrades, S. and Jiménez-Colmenero, F. 2009. Influence of adding Sea Spaghetti seaweed and replacing the animal fat with olive oil or konjac gel on pork meat batter gelation, Potential protein/alginate association. **Meat Sci** 83: 209-217.

Kuar, L., Singh, N. and Singh, J. 2004. Factor influencing the properties of hydroxyl propylated potato starch. **Carbohyd Polym** 55: 25-33.

López-López, I., Cofrades, S., Yakan, A., Solas, M.T. and Jiménez-Colmenero, F. 2010. Frozen storage characteristics of low-salt and low-fat beef patties as affected by Wakame adding and replacing pork with olive oil-in-water emulsion. **Food Res Int** 43: 1244-1254.

Luruena - Martinez, M.A., Quintana, V.I. and Revilla, I. 2004. Effect of locust bean/xanthan gum addition and replacement of pork back fat with olive oil on the quality characteristics of low - fat frankfurters. **Meat Sci** 68: 383-389.

Perez - Mateos, M., Solas, T. and Montero, P. 2002. Carrageenan and alginate effects of combined pressure and temperature in fish mince gels. **Food Hydrocolloid** 16: 225-223.

Thebaudin, J.Y., Lefebvre, A.C., Harrington, M. and Bourgeois, C.M. 1997. Dietary fibres: Nutritional and technological interest. **Trends Food Sci Tech** 8: 41-47.

การศึกษาศักยภาพของการใช้เส้นใยเซลลูโลสสำหรับเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิท

The potential of cellulose fibers usage as reinforcement for composite materials

วุฒินันท์ คงทัด[1] สุธีรา วิทยากาญจน์[1] วีรศักดิ์ สมิทธิพงศ์[1] ชนาพร งามโรจน์[1] จิรชยา บุญญฤทธิ์[1]
และ **รังสิมา ชลคุป**[1*]

Wuttinant Kongtud[1], Suteera Witayakran[1], Wirasak Smitthipong[1], Chanaporn Ngamroj[1], Jirachaya Boonyarit[1]
and Rungsima Chollakup[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เส้นใยเซลลูโลสจากใบสับปะรด กาบกล้วย เปลือกกัญชง กาบมะพร้าวอ่อน และทะลายปาล์ม สำหรับเสริมแรงในคอมพอสิทชนิดพอลีเอธิลีน และพอลีพรอพีลีน โดยค่า tensile strength พบว่าเส้นใยสับปะรด กัญชง และกล้วยมีความแข็งแรงสูงกว่า ขณะที่เส้นใยมะพร้าวและทะลายปาล์มน้ำมันให้สมบัติการยืดตัวที่สูงกว่า ส่วนการศึกษาค่าการอุ้มน้ำของเส้นใย พบว่าเส้นใยกล้วยอุ้มน้ำได้ดีที่สุด ในขณะที่เส้นใยกัญชงอุ้มน้ำได้ต่ำที่สุด สมบัติการทนความร้อน พบว่าเส้นใยสับปะรด และกล้วย ที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง และสิ่งเจือปนอื่นต่ำทำให้เกิดเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า เมื่อทดสอบสมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ชนิดพอลีเอธิลีนและพอลีพรอพีลีนด้วยวิธี pull out test พบว่าเส้นใยสับปะรดและกัญชงที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงสามารถแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวได้ดี และมีสมบัติการยึดติดในเมตริกซ์ทั้งสองชนิดดี

ABSTRACT

In this study, cellulose fibers from pineapple leaf, banana stem, hemp bast, coir, and palm oil empty fruit bunch, were investigated for potential as the reinforcement materials in polyethylene and polypropylene composites. The tensile strength of cellulose fibers was found that the pineapple, hemp and banana fibers gave these mechanical properties higher than coir and palm fibers. Meanwhile, the coir and palm fibers presented a predominance of elongation better than others. For water retention values, the banana fiber gave highest, while the hemp fiber gave lowest. Thermal properties of the pineapple and banana fibers, with high cellulose contents and low impurities, displayed better thermal stability than the others. The adhesion properties between the fibers and the polymer matrix, polyethylene and polypropylene, using the pull-out test found that pineapple and hemp fibers with high cellulose contents and split to a single fiber had good adhesion properties in both types of matrix.

Key Words: cellulose fiber, mechanical property, water retention, thermal property, composite
*Corresponding author; email address : **aaprmc@ku.ac.th**

[1]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Ngam Wong Wan Rd., Chatuchak, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันนี้การใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ทางเคมี ซึ่งย่อยสลายได้ยาก ส่งผลให้เกิดความตระหนักถึงการนำแหล่งวัสดุธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยเฉพาะการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือใช้ทางการเกษตรที่เป็นเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งถือเป็นแหล่งชีวมวลที่มีความหลากหลายและมีปริมาณมากในแต่ละปี ได้แก่ ใบสับปะรด กาบกล้วย กาบมะพร้าว และทะลายปาล์ม รวมทั้งเส้นใยจากลำต้นกัญชง ซึ่งเป็นแหล่งเส้นใยที่ใช้สำหรับศึกษาเปรียบเทียบ โดยแหล่งของเส้นใยธรรมชาติในพืชแต่ละชนิดได้มาจากส่วนประกอบที่แตกต่างกัน ทั้งจาก ลำต้น เปลือก ใบ ผล เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติที่มีองค์ประกอบหลักคือเซลลูโลส ซึ่งมีสมบัติช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างของพืช จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมพอสิท (polymer composite) ทดแทนวัสดุสังเคราะห์ เนื่องจากการมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีน้ำหนักเบา ราคาถูก มีความหนาแน่นต่ำ มีความเหนียวและสมบัติความแข็งแรงสูง ไม่ระคายเคืองในระบบหายใจ มีสมบัติทนความร้อนดี สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เทียบกับเส้นใยสังเคราะห์อื่น เช่น เส้นใยแก้ว (glass fiber) เป็นต้น (Reddy and Yang, 2005) ตัวอย่างการศึกษาการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรงในคอมพอสิท ได้แก่ การใช้เส้นใยจากใบสับปะรดเสริมแรงให้แก่พอลีพรอพีลีน และ พอลีเอธิลีน (Arib *et al*., 2006 ; Chollakup *et al*., 2010) และงานวิจัยของ Chollakup *et al*. (2013) ที่ศึกษาผลของการเตรียมเส้นใยทะลายปาล์มและมะพร้าวสำหรับการเสริมแรงให้แก่พอลีเอธิลีน จากสมบัติเหล่านี้ทำให้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยเป็นส่วนประกอบของกันชนและโครงสร้างรถ เครื่องบินและเรือเดินสมุทร และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น (Reddy and Yang, 2005 ; Ghosh and Sinha, 1977) งานวิจัยนี้ จึงเกิดความสนใจศึกษาเส้นใยเซลลูโลสจากแหล่งชีวมวลที่สำคัญในประเทศไทย เพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพสำหรับเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิท ชนิดพอลีเอธิลีน (polyethylene, PE) และพอลีพรอพีลีน (polypropylene, PP) โดยศึกษาสมบัติทางเชิงกล สมบัติการอุ้มน้ำ สมบัติทางความร้อน และสมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบเส้นใย

เส้นใยจากใบสับปะรด กาบกล้วย ลำต้นกัญชง กาบมะพร้าว และทะลายปาล์มน้ำมัน เตรียมด้วยวิธีที่ศึกษาโดย วุฒินันท์ และคณะ (2558) ตามวิธีการเตรียมเส้นใยที่เหมาะสมแต่ละชนิดของเส้นใย โดยสรุปได้ดังนี้ กาบกล้วยและใบสับปะรดด้วยการขูดด้วยเครื่องขูดเส้นใย ส่วนลำต้นกัญชงได้จากการแช่หมักในน้ำ โดยเส้นใยทั้งสามชนิดนี้ นำมาล้างน้ำสบู่และน้ำ ส่วนกาบมะพร้าวกับทะลายปาล์มน้ำมัน เตรียมจากการต้มทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยแสดงองค์ประกอบทางเคมีหลังการเตรียมใน Table 1 (วุฒินันท์ และคณะ, 2558)

Table 1 Chemical compositions of fibers

Chemical compositions	Pineapple	Banana	Hemp	Coir	Palm
1. Extractive (%)	5.57	4.14	14.85	3.37	3.68
2. Lignin (%)	4.83	10.09	5.74	26.85	10.92
3. Holo-cellulose (%)	94.62	83.40	79.87	68.46	83.28
4. Alpha-cellulose (%)	66.35	58.95	64.74	48.82	67.19
5. Hemi-cellulose (%)	28.27	24.45	15.13	19.64	16.09
6. Others (%)	4.23	4.23	2.93	4.80	6.49

ศึกษาสมบัติทางเชิงกลของเส้นใยเซลลูโลส

นำเส้นใยจากใบสับปะรด กาบกล้วย ลำต้นกัญชง กาบมะพร้าว และทะลายปาล์มน้ำมัน มาแยกออกเป็นเส้นใยเดี่ยว ที่มีความยาวมากกว่า 60 มิลลิเมตร นำเส้นใยที่คัดเลือกแล้วมายึดติดกับเฟรมกระดาษ ให้ระยะยึดระหว่างปลายเส้นใยเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และให้เส้นใยมีลักษณะตึงเป็นเส้นตรง มาทดสอบค่าความต้านแรงดึง ค่า Young's modulus ค่าการยืดตัว ตามวิธีของ ISO 5079-1955(E) ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยระยะที่ใช้ทดสอบ (gauge length) เท่ากับ 30 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการดึงเส้นใยจากใบสับปะรดและลำต้นกัญชงอยู่ที่ 3 มิลลิเมตรต่อนาที เส้นใยกาบกล้วยอยู่ที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที และเส้นใยจากกาบมะพร้าวและทะลายปาล์มที่ 25 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากเส้นใยแต่ละชนิดมีขนาดไม่เท่ากัน ส่งผลต่อความสามารถในการขาดของเส้นใย จึงกำหนดให้ใช้ความเร็วในการดึงเส้นใยแต่ละชนิดให้ขาดภายใน 20 วินาที ตามมาตรฐานของ ISO 5079-1955(E) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพื่อใช้ในการคำนวณค่าแรงต่อพื้นที่ หรือค่า Tensile strength ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Meiji, Japan) ทำการวัดสมบัติเชิงกลของเส้นใยแต่ละชนิดจำนวน 15 ซ้ำ

ศึกษาสมบัติการอุ้มน้ำ

นำเส้นใยจากใบสับปะรด กาบกล้วย ลำต้นกัญชง กาบมะพร้าว และทะลายปาล์มน้ำมัน ในปริมาณ 0.11- 0.12 กรัม มาทดสอบสมบัติการอุ้มน้ำ (water retention value) ตามวิธี ASTM D 2402 ด้วยการนำตัวอย่างเส้นใยอบที่อุณหภูมิ 50 °C นาน 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักเส้นใยหลังอบ (W_d) นำเส้นใยที่ได้แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักเส้นใย ณ ชั่วโมงที่ 3 6 9 และ 24 ชั่วโมง ตัวอย่างเส้นใยแต่ละชนิดที่แช่ตามระยะเวลาที่กำหนด จะถูกนำมาซับน้ำที่บริเวณผิวหน้าด้วยกระดาษทิชชู่ แล้วจึงชั่งน้ำหนักของเส้นใยที่ดูดซับน้ำไว้ (W_s) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำต่อชนิดเส้นใย คำนวณค่าการดูดซับน้ำ ตามสมการที่ 1

$$\text{Water retention value (\%)} = \frac{(Ws - Wd)}{Ws} x100 \qquad \text{สมการที่ 1}$$

ศึกษาสมบัติทางความร้อน

นำเส้นใยจากใบสับปะรด กาบกล้วย ลำต้นกัญชง กาบมะพร้าว และทะลายปาล์มน้ำมัน มาวัด แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA, Mettler Toledo,

USA) อัตราในการให้ความร้อน 10 °C/min ที่อุณหภูมิในช่วง 25 °C ถึง 600 °C ภายใต้สภาวะการใช้ก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้น 1%

ศึกษาสมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์

นำเส้นใยจากใบสับปะรด กาบกล้วย ลำต้นกัญชง กาบมะพร้าว และทะลายปาล์มน้ำมัน มายึดติดกับแผ่นพอลิเมอร์พอลีเอธิลีน และพอลีพรอพีลีน ด้วยวิธี compression molding จากนั้นนำแผ่นพอลิเมอร์ที่มีเส้นใยเดี่ยว มาวัดค่าแรงดึงสูงสุดที่สามารถทำให้เส้นใยขาดด้วยวิธี Pull out test ตามวิธีที่ดัดแปลงและพัฒนาตาม Chollakup *et al.* (2013) ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ที่ความเร็ว 15 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าแรงที่ได้นำมาคิดคำนวณต่อพื้นที่หน้าตัดเส้นใยด้วยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแต่ละชนิดภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (Meiji, Japan) จำนวนอย่างน้อย 5 ค่า แล้วจึงคำนวณพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเพื่อนำมาใช้คำนวณแรงยึดติดระหว่างผิวของเส้นใยในเมตริกซ์ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

สมบัติทางเชิงกลของเส้นใยเซลลูโลส

Table 2 แสดงสมบัติทางเชิงกลของเส้นใยเซลลูโลส พบว่าค่า tensile strength ซึ่งแสดงถึงแรงที่ใช้ในการดึงต่อพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแต่ละชนิด ของเส้นใยจากใบสับปะรดมีค่าสูงที่สุด รองลงมา คือ เส้นใยลำต้นกาบกล้วย กัญชง และเส้นใยกาบมะพร้าว ส่วนเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน มีค่า tensile strength ต่ำที่สุด (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) ในทางตรงกันข้าม ค่าการยืดตัวออกของเส้นใยจากกาบมะพร้าวและทะลายปาล์มกลับมีค่าที่สูงกว่า เส้นใยจากใบสับปะรด กาบกล้วย และลำต้นกัญชง เมื่อพิจารณาค่า Young's modulus พบว่าเส้นใยจากลำต้นกัญชงมีค่าสูงสุด รองลงมาคือเส้นใยจากใบสับปะรด เนื่องจากเส้นใยทั้งสองชนิดมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง โดยมีสารที่ไม่ใช่เซลลูโลสได้แก่ เฮมิเซลลูโลส และลิกนินต่ำ และมีการใช้แรงดึงปริมาณที่สูงแต่มีการยืดตัวออกของเส้นใยที่มีระยะสั้น สำหรับเส้นใยจากกาบกล้วยให้ค่า Young's modulus รองลงมา

Table 2 Mechanical properties of cellulose fibers.

	Tensile strength (MPa)	% Elongation	Young's modulus (GPa)
Pineapple	333.75 ± 59.07 ^{a}	4 ± 1 ^{c}	14.83 ± 3.81 ^{b}
Banana	214.51 ± 43.96 ^{b}	5 ± 2 ^{c}	7.29 ± 1.27 ^{c}
Hemp	213.83 ± 77.37 ^{b}	2 ± 1 ^{c}	20.89 ± 5.74 ^{a}
Coir	190.08 ± 37.71 ^{b}	27 ± 6 ^{a}	3.38 ± 0.58 ^{d}
Palm	103.48 ± 20.70 ^{c}	19 ± 2 ^{b}	2.87 ± 0.63 ^{d}

Different letters (a, b, c) in the same column mean that the results are significantly different at $P \leq 0.05$ by Duncan's Multiple-Range Test.

สมบัติการอุ้มน้ำของเส้นใยเซลลูโลส

การอุ้มน้ำของเส้นใยจากใบสับปะรด กาบกล้วย ลำต้นกัญชง กาบมะพร้าว และทะลายปาล์ม ทั้ง 5 ชนิดนี้ แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการอุ้มน้ำที่แตกต่างกัน (Figure 1) ส่วนใหญ่จะสามารถอุ้มน้ำได้คงที่ในเวลา 9 ชั่วโมงของการทดลอง โดยเส้นใยลำต้นกัญชงจะมีค่าการอุ้มน้ำที่ต่ำที่สุดเนื่องจาก เส้นใยลำต้นกัญชงมีปริมาณสารแทรกที่มากกว่าเส้นใยอื่นๆ ทำให้การอุ้มน้ำได้ไม่ดี (Marrot *et al*., 2013) ส่วนเส้นใยกาบกล้วยมีการอุ้มน้ำได้ดีที่สุด เนื่องจากเส้นใยกาบกล้วยประกอบไปด้วยแอลฟาเซลลูโลสซึ่งมีหมู่ –OH ที่มีความชอบน้ำอยู่ในปริมาณที่สูง อีกทั้งมีสารแทรกที่มีความไม่ชอบน้ำ เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณน้อย (Kabir *et al*., 2013)

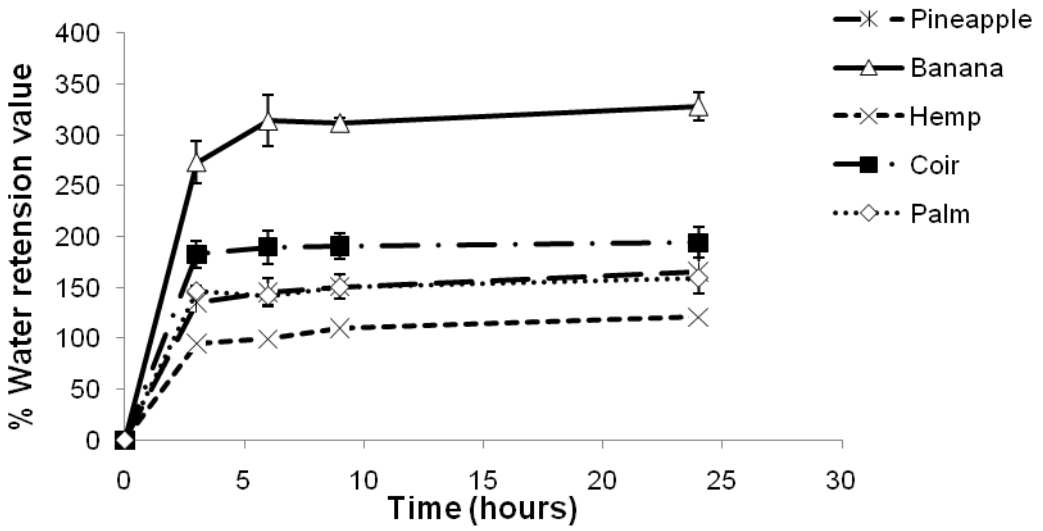


Figure 1 Water retention values of cellulose fibers versus time.

สมบัติทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลส

จากผลของสมบัติทางความร้อนของเส้นใยทั้ง 5 ชนิด (Figure 2) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของเส้นใยกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนถึง 600 °C พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเส้นใยทั้ง 5 ชนิดที่แตกต่างกัน โดยปริมาณของเส้นใยกาบกล้วย,ใบสับปะรดและลำต้นกัญชง จะเกิดการย่อยสลายตัวเนื่องจากถูกความร้อนมากในช่วงอุณหภูมิ 325 °C มีการใช้อุณหภูมิสูงกว่าการย่อยสลายทางความร้อนของทะลายปาล์มน้ำมันและกาบมะพร้าว ที่มีการย่อยสลายที่ 295 °C สอดคล้องกับการที่เส้นใย 3 ชนิดแรก ประกอบด้วยแอลฟาเซลลูโลสซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนอยู่ในช่วง 320-350 °C (Kabir *et al*., 2013) อยู่ในปริมาณที่สูงกว่าเส้นใยทะลายปาล์มและเส้นใยกาบมะพร้าว หากเปรียบเทียบมวลที่เหลืออยู่หลังการย่อยสลายของเส้นใยแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่าเส้นใยกาบมะพร้าว ทะลายปาล์ม และลำต้นกัญชง มีมวลที่เหลือและสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่เซลลูโลสอยู่สูงกว่าเส้นใยจากใบสับปะรดและกาบกล้วย ดังนั้นเส้นใยกาบกล้วยที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง และสิ่งเจือปนอื่นๆ อยู่ต่ำทำให้เกิดเสถียรภาพทางความร้อนดี

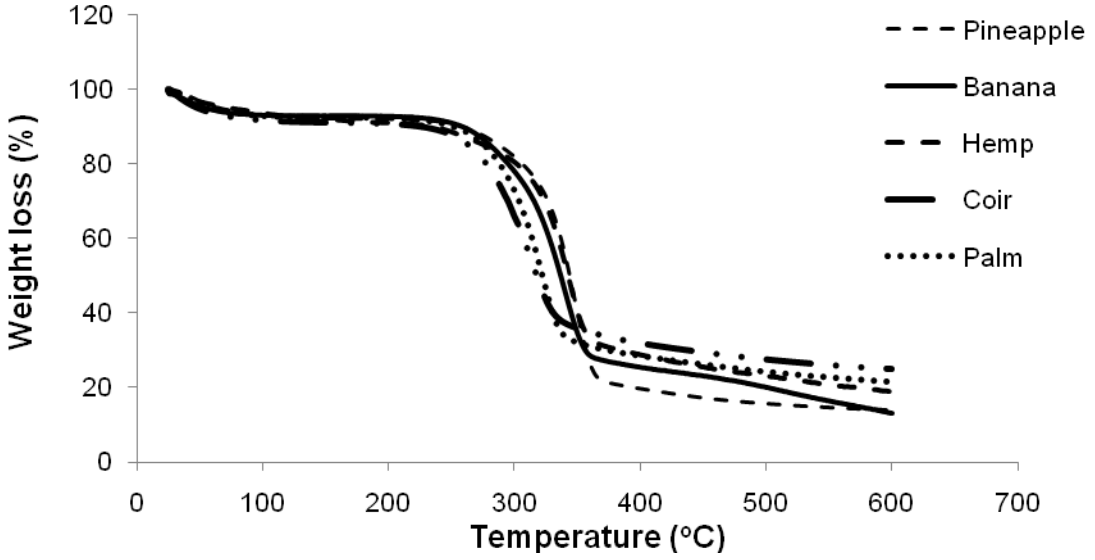


Figure 2 TGA curves of different cellulose fibers.

สมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์

การติดกันระหว่างเส้นใยเดี่ยวกับพอลิเมอร์ โดยใช้พอลิเมอร์ 2 ชนิดคือ พอลีเอธิลีน (PE) และพอลีพรอพีลีน (PP) ทดสอบสมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ด้วยวิธี pull out test โดยเปรียบเทียบเส้นใยทั้ง 5 ชนิด คือ เส้นใยจากใบสับปะรด กาบกล้วย ลำต้นกัญชง กาบมะพร้าว และทะลายปาล์มน้ำมัน (Figure 3) พบว่าในเมตริกซ์ของ PE และ PP เส้นใยจากใบสับปะรดซึ่งมีขนาดเส้นใยละเอียดที่สุด (ขนาดเส้นใยของเส้นใยสับปะรด กาบกล้วย ลำต้นกัญชง กาบมะพร้าว และทะลายปาล์มน้ำมัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 57, 174, 96, 100 และ 197 ไมโครเมตร ตามลำดับ) และมีองค์ประกอบของสารที่ไม่ใช่เซลลูโลสต่ำ ทำให้พื้นผิวของเส้นใยค่อนข้างสะอาดเมื่อนำมา ทดสอบด้วยวิธี pull out test จึงให้ค่าสูงที่สุด รองลงมาคือเส้นใยจากลำต้นกัญชง ทะลายปาล์มน้ำมัน กาบมะพร้าวและกาบกล้วย ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณเซลลูโลสที่มีในเส้นใยหลังผ่านการเตรียมเส้นใยด้วยวิธีต่าง ๆ ผลที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Chollakup *et al*. (2013) ซึ่งวัดค่า pull-out ของเส้นใยกาบมะพร้าวและเส้นใยจากปาล์มน้ำมัน ที่ผ่านการเตรียมเส้นใยด้วยด่างและฟอกขาว ซึ่งพบว่า เส้นใยจากปาล์มน้ำมันมีค่าแรง pullout สูงกว่าเส้นใยกาบมะพร้าวเนื่องจากสามารถกำจัดสิ่งเจือปนอื่นออกไปได้มาก ทำให้ปริมาณเซลลูโลสมีมากกว่า และเส้นใยแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวได้มากขึ้น

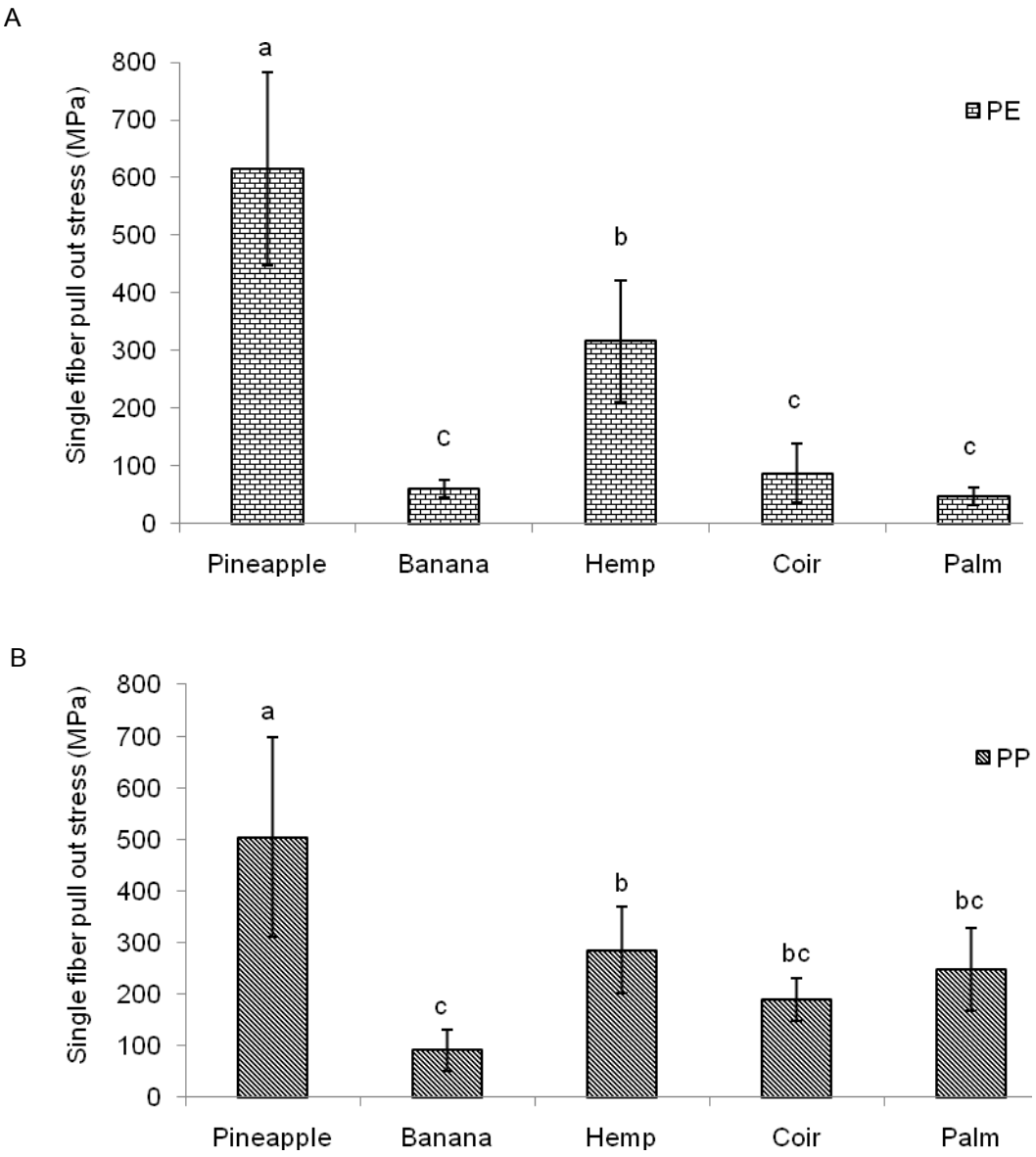


Figure 3 Pull-out stress of cellulose fibers. (A: reinforced with polyethylene (PE), B: reinforced with polypropylene)

Different letters (a, b, c) in the same column mean that the results are significantly different at $P \leq 0.05$ by Duncan's Multiple-Range Test.

สรุป

เส้นใยธรรมชาติทั้ง 5 ชนิดจาก ใบสับปะรด กาบกล้วย ลำต้นกัญชง กาบมะพร้าวและทะลายปาล์มเป็นวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตร เมื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพสำหรับใช้เสริมแรงในวัสดุคอมพอสิท และด้านสมบัติเชิงกลทั้ง 5 ชนิด พบว่า เส้นใยจากใบสับปะรดจะมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคือเส้นใยลำต้นกัญชง มีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าเส้นใยกาบกล้วย กาบมะพร้าวและทะลายปาล์ม แต่เส้นใยกาบมะพร้าวและทะลายปาล์ม จะมีความสามารถในการยืดตัวได้สูงกว่าเส้นใยอื่นๆ สมบัติการอุ้มน้ำของเส้นใยจากกาบกล้วยจะสามารถอุ้มน้ำได้ดีที่สุด ส่วนสมบัติทางความร้อน พบว่าเส้นใยใบสับปะรดและเส้นใยกาบกล้วย

สามารถทนความร้อนได้สูงกว่าเส้นใยลำต้นกัญชง ทะลายปาล์ม และกาบมะพร้าว ตามลำดับ เมื่อนำมาทดสอบสมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ ชนิดพอลีเอธิลีนและพอลีพรอพีลีนด้วยวิธี pull out test พบว่าเส้นใยใบสับปะรดมีการยึดติดกับพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดได้ดีที่สุด รองลงมาคือเส้นใยกัญชง ที่ยึดติดกับพอลีเอธิลีนและพอลีพรอพิลีนได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการสนับสนุนและส่งเสริมการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

วิชัย หฤทัยธนาสันติ์, สุชาดา อุชชิน, วิบูลย์ น้อยใจบุญ, รังสิมา ชลคุป, ทินโน ขวัญดี, พรชัย ตุลพิจิตร, และ วนิดา ผาสุขดี. 2548. **รายงานฉบับสมบูรณ์ ชุดโครงการต้นแบบการใช้ประโยชน์จากเส้นใยของใบสับปะรด** เสนอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย กรุงเทพมหานคร, 300 หน้า.

วุฒินันท์ คงทัด, วีรศักดิ์ สมิทธิพงศ์, สุธีรา วิทยากาญจน์, จิรชยา บุญญฤทธิ์ และ รังสิมา ชลคุป. 2558. **รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่อง การศึกษาสมบัติพื้นผิวและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลสสำหรับศักยภาพของการนำมาทำคอมพอสิท** เสนอต่อสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 75 หน้า.

Arib, R.M.N., S.M. Sapuan, M.M.H.M. Ahmad, M.T. Paridah and H.M.D.K. Zaman. 2006. Mechanical properties of pineapple leaf fibre reinforced polypropylene composites. **Materials and Design** 27: 391-396

Chollakup, R., W. Smitthipong, W. Kongtud and R. Tantatherdtam. 2013. Polyethylene reinforced by cellulose fibers (coir and palm fibers) : effect of fiber surface preparation and fiber content. **Journal of Adhesion Science and Technology** 27: 1290-1300.

Chollakup, R., R. Tantatherdtam, S. Ujjin, S., and K. Sriroth. 2011. Pineapple leaf fiber reinforced thermoplastic composites: Effect of fiber length and fiber content on their characteristics. **Journal. of Applied Polymer Science** 119(4): 1952-1960.

Ghosh, S. and M.K. Sinha. 1977. Assessing textile value of pineapple fiber. **Indian Journal of Fibre&Textile Research** 88: 111-115.

Kabir, M.M., H. Wang, K.T. Lau and F. Cardona. 2013. Effects of chemical treatments on hemp fibre structure. **Applied Surface Science** 276: 13-23.

Marrot, L., A. Lefeuvre, B. Pontoire, A. Bourmaud and C. Baley. 2013. Analysis of the hemp fiber mechanical properties and their scattering (Fedora 17). **Industrial Crops and Products** 51: 317-327

Reddy, N. and Y. Yang. 2005. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. **Trends in Biotechnology** 23(1): 22-27.

การปรับปรุงกระบวนการอบแห้งของโรงหีบน้ำมันปาล์มดิบขนาดเล็กเพื่อเพิ่มค่าโดบี้ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

Drying Process Improvement of Small Crude Palm Oil Mill for DOBI Increasing to Meet the Standard Requirement

รยากร นกแก้ว[1,2] วันลภ อารีรบ[3] และ วิทยา ปั้นสุวรรณ[1,2*]

Rayakorn Nokkaew[1,2], Wallop Arirob[3] and Vittaya Punsuvon[1,2*]

บทคัดย่อ

ปัญหาของโรงหีบน้ำมันขนาดเล็กคือค่าโดบี้ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด โดยค่าโดบี้จะเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดคุณภาพน้ำมันปาล์มดิบและกำหนดราคารับซื้อน้ำมันปาล์ม งานวิจัยฉบับนี้เป็นการปรับปรุงกระบวนการอบผลปาล์มของโรงหีบน้ำมันปาล์มดิบขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มค่าโดบี้ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ (90 และ 120 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาการให้ความร้อน (2-19 ชม.) และเปรียบเทียบระหว่างมีและไม่มีการระบายอากาศขณะอบแห้งผลปาล์ม ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบผลปาล์มคือ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 16 ชม. และมีการระบายอากาศขณะทำการอบผลปาล์ม ค่าโดบี้ที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด สาเหตุที่ทำให้ค่าโดบี้ลดลงคือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในน้ำมันปาล์มและในสารแคโรทีนถูกทำลายขณะที่อบผลปาล์มด้วยลมร้อน จากผลการทดลองที่ได้จะสามารถช่วยให้โรงหีบขนาดเล็กผลิตน้ำมันปาล์มคุณภาพดีเทียบเท่ากับโรงหีบขนาดใหญ่

ABSTRACT

The problem of a small crude palm oil mill is low DOBI which it is not meet commercial. The DOBI is important factor for indication of a crude palm oil quality and a palm oil price. This research is to improve the drying process of the mill for DOBI increasing to meet the standard requirement. The variables for study are temperature (90 and 120°C), drying time (2-19 h) and comparison of ventilation and non-ventilation system in drying process. The results found that the optimum conditions were 90°C of temperature for 16 h of drying time and the drying operated with ventilation system. The extracted oil gave DOBI met the standard requirement. In addition, the case for DOBI decreasing occurred from oxidation of the palm oil and the destroyed carotene during drying.

Key Words: DOBI, drying, improvement, ventilation, oxidation

* Corresponding author; e-mail address: **fscivit@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาการด้านปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Center of Excellent Palm Oil, Kasetsart University, Bangkok 10900

[3]ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[3]Department of Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

โดบี้ (DOBI) หรือ Deterioration Of Bleachability Index เป็นค่าที่บอกคุณภาพของน้ำมันปาล์มดิบ และยังเป็นค่าที่ใช้กำหนดปริมาณของแป้งฟอกสี (Bleaching earth) ที่ใช้ในการฟอกสีน้ำมันปาล์มดิบจากสีส้มแดงให้กลายเป็นสีเหลืองอ่อนของโรงกลั่นน้ำมันปาล์ม ซึ่งค่าโดบี้ต่ำหมายถึงจะต้องใช้ปริมาณแป้งฟอกสีในปริมาณมากกว่าน้ำมันปาล์มดิบที่มีค่าโดบี้สูง ดังนั้นค่าโดบี้ที่ต่ำจะทำให้โรงกลั่นน้ำมันปาล์มมีต้นทุนในการผลิตน้ำมันเพิ่มขึ้นคือ ต้องใช้แป้งฟอกสีในปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าค่าโดบี้ในน้ำมันปาล์มต่ำกว่า 2 (DOBI<2) โรงกลั่นน้ำมันปาล์มจะไม่รับซื้อ ดังนั้นโรงหีบน้ำมันปาล์มก็จะมีตลาดเดียวที่ขายได้คือ ขายให้แก่โรงงานผลิตอาหารสัตว์ซึ่งเป็นตลาดที่แคบมาก มีความต้องการน้ำมันปาล์มดิบประมาณ 5 ล้านตัน/ปี และราคาน้ำมันปาล์มดิบที่รับซื้อก็รับซื้อในราคาต่ำ แต่ถ้าน้ำมันปาล์มดิบมีค่าโดบี้มากกว่า 2 (DOBI>2) โรงหีบน้ำมันสามารถขายน้ำมันให้แก่โรงกลั่นน้ำมันเพื่อนำไปผลิตน้ำมันสำหรับบริโภคและยังนำไปผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซลได้อีกด้วย โดยตลาดผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบเป็นตลาดใหญ่ที่มีความต้องการน้ำมันปาล์มสูงถึงปีละประมาณ 700 ล้านตัน/ปี และราคาน้ำมันปาล์มดิบที่ขายให้แก่โรงกลั่นก็จะสูงกว่าขายให้โรงงานอาหารสัตว์ ประมาณลิตรละ 1 – 1.5 บาท ด้วย ดังนั้นตลาดการใช้น้ำมันปาล์มดิบในการผลิตไบโอดีเซลจะเป็นตัวกระตุ้นให้โรงหีบน้ำมันปาล์มขนาดเล็กที่มีมากกว่า 30 โรงงาน ทั่วประเทศไทยหันมาพัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันเพื่อให้น้ำมันปาล์มดิบที่ผลิตได้มีค่าโดบี้สูงกว่า 2 ขึ้นไป

ค่าโดบี้เป็นค่าที่พัฒนาโดย Dr. P. A.T. Swoboda จากสถาบัน The Palm Oil Research Institute ของประเทศมาเลเซีย ซึ่งค่าโดบี้สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 446 นาโนเมตร (A_{446nm}) ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 269 นาโนเมตร (A_{269nm}) โดยที่ค่า A_{446nm} เป็นค่าที่บอกถึงความสุกของผลปาล์มที่นำมาหีบน้ำมันและยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของเม็ดสีแคโรทีนที่มีสีส้มแดงที่ประกอบอยู่ในผลปาล์มสุก ส่วนค่า A_{269nm} จะเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่สอง (Secondary oxidation) โดยสารผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ได้แก่ สารประกอบอัลดีไฮด์ (Aldehyde) คีโตน (Ketone) และกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) โดยน้ำมันปาล์มในผลปาล์มสุกจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ และการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ในการอบผลปาล์มก่อนการหีบน้ำมันจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดียิ่งขึ้น

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบของโรงหีบน้ำมันขนาดเล็ก (โรงหีบชุมชน) จะทำการหีบน้ำมันจากผลปาล์มทั้งผลคือจะหีบเปลือกปาล์มและเมล็ดในปาล์มพร้อมกัน โดยมีขั้นตอนการผลิตน้ำมันทั้งหมด 6 ขั้นตอน เรียงลำดับดังต่อไปนี้ ขั้นที่ 1 การแยกผลปาล์มสุกออกจากทะลายปาล์ม ขั้นที่ 2 การอบผลปาล์มสุกด้วยความร้อนจากลมร้อนโดยใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง ขั้นที่ 3 การบีบน้ำมัน ขั้นที่ 4 การกรองแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำมัน ขั้นที่ 5 การกำจัดน้ำออกจากน้ำมันปาล์ม และขั้นตอนสุดท้ายคือขั้นที่ 6 การเก็บรักษาน้ำมันปาล์มให้อยู่ในสภาพของเหลว ซึ่งในกระบวนการผลิตพบว่าขั้นตอนที่มีผลกระทบต่อค่าโดบี้ของน้ำมันปาล์มมากที่สุดคือขั้นตอนของการอบผลปาล์ม (ขั้นที่ 2) ซึ่งความร้อนในการอบผลปาล์มจะทำให้ค่าโดบี้ลดต่ำลง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ปรับปรุงสภาวะของการอบผลปาล์ม โดยศึกษาเปรียบเทียบอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้อบผล

ปาล์ม รวมทั้งศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของการไม่ระบายอากาศ และการระบายอากาศของการอบผลปาล์ม โดยน้ำมันปาล์มดิบที่ผลิตได้ต้องให้ค่าโดบี้อยู่ในเกณฑ์ที่สูงเกินกว่า 2

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองการอบผลปาล์มสด

ก. อบโดยไม่มีการระบายอากาศ

นำผลปาล์มน้ำหนัก 200-300 กก. เข้าเตาอบผลปาล์มของโรงงาน แสงอรุณ ปาล์มออยล์ จำกัด จังหวัดพังงา โดยจะทดลองอบผลปาล์มที่อุณหภูมิ 90°C และ 120°C ทดลองให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 18 ชม. (เป็นเวลาให้ความร้อนที่โรงงานใช้อยู่จริง) และ 20 ชม. (เป็นเวลาที่ต้องการทดสอบเพิ่มเติม) โดยที่เตาอบที่ใช้จะไม่มีการระบายอากาศ (ระบบปิด) และมีการทดลองเพิ่มเติมในการใช้เวลาในการอบตั้งแต่ 11-16 ชม. จากนั้นนำผลปาล์มหลังการอบมาหีบน้ำมันด้วยเครื่องหีบแบบสกรู (Screw press) นำน้ำมันที่หีบได้มากรองแยกสิ่งปนเปื้อนด้วยเครื่องกรองแบบฟิวเตอร์เพลส (Filter press) และทำการไล่น้ำออกจากน้ำมันโดยใช้การต้มไล่น้ำ น้ำมันปาล์มดิบที่ได้จะนำมาวิเคราะห์หาค่าโดบี้ และปริมาณแคโรทีน

หมายเหตุ ตัวอย่างผลปาล์มสุกที่นำมาทดลองคือผลปาล์มร่วงจากทะลายปาล์มตามธรรมชาติประมาณ 10 เมล็ด/ทะลาย (หลักเกณฑ์ทั่วไปที่โรงงานกำหนดให้ตัดผลปาล์มจากต้น)

ข. อบโดยมีการระบายอากาศ

เลือกอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ ก. มาทดลองต่อ โดยทำการทดลองเหมือนข้อ ก. แต่เปลี่ยนจากไม่ระบายอากาศ (ระบบปิด) เป็นมีการระบายอากาศ (ระบบเปิด) คือขณะอบผลปาล์มมีการเปิดฝาเตาอบเพื่อระบายอากาศเป็นเวลา 10 นาที ทุก 1 ชม. ของการทดลอง โดยทำการทดลองให้ความร้อนที่เวลาตั้งแต่ 2-19 ชม. จากนั้นนำผลปาล์มที่ผ่านการทดลองแต่ละสภาวะมาหีบน้ำมันและนำน้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์ค่าโดบี้ และค่าปริมาณแคโรทีน



Figure 1 Process of palm oil production of Sangarung Palm Oil Industry

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันปาล์ม

ก. การวิเคราะห์ค่าโดบี้ วิเคราะห์ตามวิธีของ PORIM Test Method (Loh และคณะ 2006) ทำโดยละลายน้ำมันปาล์มลงในตัวทำละลายเฮกเซน แล้วนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 446 นาโนเมตร และที่ค่าการดูดกลืนแสง 269 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (PG Instruments, T70+UV/VIS spectrometer, USA) ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสองนำไปคำนวณหาค่าโดบี้ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 1

$$\text{ค่าโดบี้} = \frac{A_{446nm}}{A_{269nm}} \quad \text{--- (1)}$$

ข. ค่าปริมาณแคโรทีน (Carotene content) จะวิเคราะห์ตามวิธีของ PORIM Test Method (1995) โดยสามารถอธิบายย่อๆได้ดังนี้ คือ ละลาย 0.1 กรัม ของน้ำมันปาล์มใน 25 มิลลิลิตร ของเฮกเซน หลังจากนั้นนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 446 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณแคโรทีน ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2

$$\text{ปริมาณแคโรทีน (ppm)} = \frac{383 \times A_{446\ nm} \times V}{100 \times W} \quad \text{--- (2)}$$

เมื่อ ค่าตัวเลข 383 คือ ค่าDiffusion coefficient

$A_{446\ nm}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 446 นาโนเมตร

V คือ ปริมาตรเฮกเซน (มิลลิลิตร)

W คือ น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม (กรัม)

หมายเหตุ ในการวิเคราะห์ค่า DOBI และ Carotene ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการอบผลปาล์มที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่างๆ โดยไม่มีระบบระบายอากาศ

ผลปาล์มสุก (Ripe palm fruit) ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลองจะถูกนำมาสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย-เฮกเซนโดยใช้เครื่องสกัดแบบซ็อกเล็ต (Soxhlet extraction instrument; Buchi, B811, Switzerland) น้ำมันที่สกัดได้จะนำมาวิเคราะห์หาค่าโดบี้ และปริมาณแคโรทีน ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันปาล์มก่อนการอบและน้ำมันปาล์มภายหลังการอบด้วยเตาอบจากโรงงานแสงอรุณปาล์มออยล์ จำกัด แสดงใน Table 1

Table 1 Drying of oil palm fruits without ventilation system at different temperature and time

Sample	DOBI*	Carotene* (ppm)
Ripe palm fruits	2.96	495
Oil (dry at 90°C for 18 h)	1.21	419
Oil (dry at 90°C for 20 h)	1.00	484
Oil (dry at 120°C for 18 h)	1.26	458
Oil (dry at 120°C for 20 h)	1.04	460

หมายเหตุ *ผลการวิเคราะห์คือค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ, เวลาที่ 18 ชม. และ 20 ชม. เป็นเวลาที่โรงงานใช้ในการอบผลปาล์มจริงในการปฏิบัติงาน เพื่อให้ผลปาล์มมีความชื้นเหลืออยู่ประมาณ 8%

ผลการทดลองจาก Table 1 เมื่อเปรียบเทียบค่าโดบี้ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ระยะเวลาในการอบต่างกัน พบว่าเมื่อระยะเวลาในการอบนานขึ้นจะทำให้ค่าโดบี้มีค่าต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าโดบี้ที่ระยะเวลาในการ

อบเท่ากันแต่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าค่าโดบี้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าการอบที่อุณหภูมิ 90°C และ 120°C ไม่ส่งผลต่อค่าโดบี้ นั่นคือการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 120°C ไม่ทำลายเม็ดสีแคโรทีน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าโดบี้ของน้ำมันที่ได้จากการอบของสองอุณหภูมิที่ทดลองกับน้ำมันปาล์มดิบก่อนการอบความร้อน พบว่าค่าโดบี้มีค่าลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด (ค่าโดบี้ลดจาก 2.96 เหลือประมาณ 1) แต่ปริมาณแคโรทีนที่มีอยู่ในน้ำมันแทบจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่าค่าโดบี้ที่ลดต่ำลงเกิดจากปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่สองเกิดขึ้นในปริมาณมากขึ้น (พิจารณาจากสมการ 1) โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นในขณะทำการอบผลปาล์ม

ผลของการอบผลปาล์มที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยไม่มีระบบระบายอากาศ

Table 2 Drying of oil palm fruits without ventilation system at different time

Sample	DOBI*	Carotene* (ppm)
Ripe palm fruits	2.26	473
Palm fruits (dry at 90°C for 11 h)	2.24	702
Palm fruits (dry at 90°C for 13 h)	1.43	522
Palm fruits (dry at 90°C for 15 h)	1.15	497
Palm fruits (dry at 90°C for 16 h)	1.33	539

หมายเหตุ *ผลการวิเคราะห์คือค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

ผลการทดลองจาก Table 2 เป็นการวิเคราะห์ค่าโดบี้และปริมาณแคโรทีนในระบบที่ไม่มีการระบายอากาศที่ระยะเวลาต่างๆกันของการอบผลปาล์มที่อุณหภูมิ 90°C โดยคณะวิจัยได้ทดลองเก็บตัวอย่างผลปาล์มเริ่มต้นและผลปาล์มที่ผ่านการอบด้วยลมร้อนที่เวลาต่างๆ แล้วนำผลปาล์มที่ได้มาสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซนและนำน้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์ค่าโดบี้และปริมาณแคโรทีน ซึ่งผลที่แสดงใน Table 2 พบว่าในช่วงระยะเวลา 11 ชม. ของการอบผลปาล์มค่าโดบี้เปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มเริ่มต้น แต่เมื่อระยะเวลาการอบเพิ่มขึ้นจนถึง 16 ชม. ค่าโดบี้จะลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ผลของปริมาณแคโรทีนกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคโรทีนจากน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้น จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการที่ค่าโดบี้ลดต่ำลงมากในขณะที่ปริมาณแคโรทีนกับมีค่าสูงกว่าน้ำมันปาล์มเริ่มต้นเป็นผลมาจากการเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่สองเกิดขึ้นเป็นปริมาณมาก ซึ่งเห็นได้ชัดหลังให้ความร้อนกับผลปาล์มเป็นเวลา 11 ชม.

ผลของการอบผลปาล์มที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่ระยะเวลาต่างกัน โดยมีระบบระบายอากาศ

ผลการทดลองจาก Table 3 เป็นผลการวิเคราะห์ค่าโดบี้และปริมาณแคโรทีนที่ทำการอบในระบบที่มีการระบายอากาศในระยะเวลาที่ต่างกัน ที่อุณหภูมิการให้ความร้อน 90°C ในการทดลองจะเก็บตัวอย่างผลปาล์มเริ่มต้นและตัวอย่างผลปาล์มที่อบในระยะเวลาต่างๆ แล้วนำมาสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเฮกเซน น้ำมันที่ได้ภายหลังการสกัดจะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าโดบี้และปริมาณแคโรทีน ผลการทดลองพบว่าในช่วง 16 ชม. ของการอบ ค่าโดบี้เปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่ภายหลังจาก 16 ชม. ค่าโดบี้จะลดต่ำลงมาก แต่ค่าปริมาณแคโรทีนกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคโรทีนของน้ำมันปาล์มดิบเริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่ค่าโดบี้ลด

ต่ำลงมากเกิดจากการเกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่สองเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากหลังจากระยะเวลา 16 ชม. ของการอบผลปาล์ม ซึ่งสาเหตุที่การอบโดยมีระบบการระบายอากาศสามารถอบผลปาล์มได้ระยะเวลานาน โดยที่ค่าโดบี้เปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพราะมีการระบายไอน้ำออกจากเตาอบ ซึ่งถ้าไม่มีการระบายไอน้ำออกจากเตาอบ ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะควบแน่นกลั่นตัวเป็นน้ำและทำปฏิกิริยากับกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่หนึ่งและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่สอง แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้คือ

ปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่หนึ่ง:

กรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมัน + น้ำ ⟶ สารประกอบแอลกอฮอล์

ปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่สอง:

สารประกอบแอลกอฮอล์ + ออกซิเจน ⟶ (ความร้อน) สารประกอบอัลดีไฮด์ และ คีโตน

Table 3 Drying of oil palm fruits with ventilation system at different time

ตัวอย่าง	DOBI*	Carotene* (ppm)
Ripe palm fruits	2.26	473
Palm fruits (dry at 90°C for 2 h)	2.22	526
Palm fruits (dry at 90°C for 4 h)	2.68	635
Palm fruits (dry at 90°C for 6 h)	2.52	605
Palm fruits (dry at 90°C for 9 h)	2.66	798
Palm fruits (dry at 90°C for 12 h)	2.28	606
Palm fruits (dry at 90°C for 16 h)	2.46	669
Palm fruits (dry at 90°C for 19 h)	1.40	513

หมายเหตุ *ผลการวิเคราะห์คือค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

สรุป

กระบวนการอบแห้งผลปาล์มด้วยลมร้อนสำหรับโรงหีบขนาดเล็กเป็นกระบวนการที่ทำให้ค่าโดบี้ในน้ำมันปาล์มมีค่าต่ำกว่ามาตรที่กำหนด (DOBI<2) จากผลการทดลองพบว่าสาเหตุของการทำให้ค่าโดบี้มีค่าต่ำคือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันปาล์มดิบ โดยการระบายอากาศขณะทำการอบผลปาล์มจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่หนึ่งไม่ให้เกิดเป็นสารประกอบแอลกอฮอล์ ซึ่งแอลกอฮอล์นี้จะเกิดปฏิกิริยากับอากาศในปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่สอง ส่งผลให้ปริมาณอัลดีไฮด์ และคีโตนมีปริมาณสูงขึ้น เมื่อผลิตภัณฑ์ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันครั้งที่สองมีค่ามากจึงส่งผลให้ค่าโดบี้ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำลง โดยระยะเวลาในการให้ความร้อนที่นานขึ้นจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น จากการทดลองได้สภาวะที่เหมาะสมในการอบผลปาล์มด้วยลมร้อนคือ มีการระบายอากาศขณะอบผลปาล์ม อุณหภูมิที่ใช้คือ 90°C และใช้เวลาในการอบผล

ปาล์ม 16 ชม. น้ำมันปาล์มดิบที่ได้มีค่าโดบี้มากกว่า 2 และโรงงานแสงอรุณ ปาล์มออยล์ จำกัด จังหวัดพังงา ได้นำผลการทดลองนี้ไปปรับปรุงกระบวนการอบน้ำมันด้วยลมร้อนและได้น้ำมันที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานค่าโดบี้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการบ่มเพาะธุรกิจวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม โครงการอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคใต้ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย และบริษัทแสงอรุณปาล์มออยล์ จำกัด ที่ร่วมทำงานวิจัยรวมทั้งสนับสนุนผลปาล์มและน้ำมันปาล์มสำหรับการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

น้ำมันปาล์มสำหรับบริโภค. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 288-2535 สำนักผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

Azeman, N. H., N. A. Yusof and A. I. Othman. 2014. Detection of free fatty acid in crude palm oil. **Asian Journal of Chemistry** 27(5): 1569-1573.

Bonnie, T. Y. P. and Y. M. Choo. 1999. Oxidation and degradation of carotenoids. **Journal of Oil Palm Research** 2(1): 62-78.

Cheng, S. F., N. L. Mohd and C. H. Chuah. 2011. Microwave pretreatment: A clean and dry method for palm oil production. **Industrial Crop and Products** 34: 967-971.

Cho, E. and D. B. Min. 2006. Mechanisms and factors for edible oil oxidation. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety** 5: 169-186.

Fauzi, N. A. M. and M. R. Sarmidi. 2010. Extraction of heat treated palm oil and their stability on β-carotene during storage. **Journal of Science and Technology**. 2(1): 45-54.

Kaur, J. and R. Sambanthamurthi. 2008. Carotenoid profiles and preliminary investigation on carotenoid (Elaeis guineensis) mesocarp. **Journal of Oil Palm Research Special Issue on Malaysia-MIT Biotechnology Partnership Programme** 2: 108-117.

Lin, S. W. 2004. Deterioration of bleachability index. **Malaysian Palm Oil board, Ministry of Plantation Industries and Commodities, Malaysia.**

Subroto, E., R. Manurung, H. J. Heeres and A. A. Broekhuis. 2015. Mechanical extraction of oil from *Jatropha Curcas* L. kernel: Effect of processing parameter. **Industrial Crops and Products** 63: 303-310.

สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการสกัดแคโรทีนอยด์จากฟักข้าว (*Momordica cochinchinensis*)

The Optimal Pretreatment of Gac Fruit (*Momordica cochinchinensis*) for Carotenoid Extraction

สุภัสสรา เนตรน้อย[1*] และ ทานตะวัน พิรักษ์[1]

Supassara Natnoi[1*] and Tantawan Pirak[1]

บทคัดย่อ

ฟักข้าว (*Momordica cochinchinensis*) เป็นพืชในตระกูลแตงซึ่งเป็นแหล่งของแคโรทีนอยด์ที่ดี เนื่องจากในฟักข้าวมีปริมาณไลโคปีนมากกว่าในมะเขือเทศถึง 3 เท่า การทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ช่วยกำจัดองค์ประกอบของไขมันหรือน้ำตาลที่ไม่ต้องการ ซึ่งเชื่อมต่อกับแคโรทีนอยด์ด้วยพันธะเอสเทอร์ จากการเปรียบเทียบระหว่างสารสกัดที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน ผ่านการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันแบบร้อน และปฏิกิริยาแบบเย็น ด้วยสารเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 5, 20 และ 40) พบว่าอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความเข้มข้นของสารแคโรทีนอยด์และร้อยละความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สภาวะการสกัดที่ดีที่สุด คือการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันแบบเย็น (อุณหภูมิห้อง) ในส่วนของเนื้อในฟักข้าว ที่ความเข้มข้นของเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 จะได้ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์มากที่สุด (0.826 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักฟักข้าวแห้ง)

ABSTRACT

Gac fruit (*Momordica cochinchinensis*) is the plant in the *Cucurbitaceae* family. It is a good source of carotenoid because it contains lycopene more than tomato for 3 times. The saponification reaction is the important step that eliminates unwanted fatty acid or sugar linked with carotenoid via ester bound. The comparison of unsaponification and saponification reaction among hot saponification, cold saponification in methanolic potassium hydroxide (5%, 20% and 40%) were studied. The extraction temperature and concentration of methanolic potassium hydroxide affected carotenoid content and the percentage of DPPH radical scavenging activity. The best extraction condition was cold saponification reaction (room temperature) of pericarp in 40 % of methanolic potassium hydroxide. This extraction condition yielded the extracts with the highest carotenoid content (0.826 ug/g of dried gac fruit).

Key Words: gac fruit, saponification, carotenoid extraction

[*]Corresponding author; E-mail address: g5715001013@ku.ac.th

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Production Development, Faculty of Argo-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ฟักข้าว (*Momordica cochinchinensis*) เป็นพืชในตระกูลแตงและมะระ ที่พบได้ในเขตร้อนชื้น เช่น เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หรือเอเชียกลาง เป็นต้น โดยทั่วไปชาวเวียดนามจะใช้ฟักข้าวลูกสุกเป็นองค์ประกอบในข้าวแดง (Xoi rice) ในปี 2006 Vuong *et al.* ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของฟักข้าว พบว่าฟักข้าวมีปริมาณของแคโรทีนอยด์สูงเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่น เช่น มะเขือเทศ แครอท หรือมะละกอ เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไลโคปีนซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์ในกลุ่มแคโรทีน ในฟักข้าวมีมากกว่าในมะเขือเทศถึง 3 เท่า

แคโรทีนอยด์เป็นสารรงควัตถุสีแดงหรือเหลือง มีฤทธิ์ต้านทานอนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคมะเร็งที่ต่อมลูกหมาก มะเร็งในระบบย่อยอาหาร โรคที่เกี่ยวข้องกับประสาทตาในผู้สูงอายุ (Nhung *et al.,* 2010) นักวิทยาศาสตร์ค้นพบแคโรทีนอยด์ครั้งแรกตั้งแต่ศตวรรษที่19 โดยนิยามว่าแคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่สามารถละลายได้ในไขมัน ซึ่งพบมากในอาหารประเภทผักและผลไม้ (Murillo *et al*., 2010)

ในปี 2014 Amorim-Carrilho *et al*. ได้แบ่งแคโรทีนอยด์ออกเป็นสองกลุ่ม คือกลุ่มที่ไม่มีโมเลกุลของออกซิเจนอยู่ในโครงสร้าง เรียกว่าแคโรทีน เช่น บีต้าแคโรทีน ไลโคปีน เป็นต้น และกลุ่มที่มีโมเลกุลของออกซิเจนอยู่ในโครงสร้าง เรียกว่าแซนโทฟิลล์ เช่น ลูทีน ซีแซนทีน เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า แคโรทีนอยด์ที่พบในผักและผลไม้สามารถอยู่ในรูปอิสระหรือยึดเกาะอยู่ในรูปเอสเทอร์กับกรดไขมัน โปรตีน และน้ำตาลได้ เช่น ลูทีน ที่ยึดเกาะอยู่กับกรดไขมัน เรียกว่ากรดปาล์มิติก หรือแคพแซนทินในพริก (paprika) ที่อยู่ในรูปเอสเทอร์กับกรดลอริก เป็นต้น (นิธิยา, 2553; Nhung *et al.,* 2010) โดยทั่วไปในขั้นตอนการสกัดสารแคโรทีนอยด์จากผักและผลไม้ นักวิจัยจะพิจารณาถึงความจำเป็นในการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันหลังการสกัด เพื่อช่วยในการกำจัดสารที่ไม่ต้องการและทำให้ได้แคโรทีนอยด์ที่อยู่ในรูปอิสระมากขึ้น (Rodriguez-Amaya and Kimura, 2004) และจะทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันโดยสารละลายเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (methanolic KOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-60 (w/v) ภายใต้ความร้อน หรือในอุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารละลายแอลคาไลน์ที่ใช้ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปฏิกิริยาและความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่ได้ (Kopec *et al*., 2012)

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่าง สำหรับการสกัดแคโรทีนอยด์จากฟักข้าว รวมไปถึงการศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (methanolic KOH) ต่อการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน ที่มีผลต่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่สกัดได้ และร้อยละความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ เพื่อใช้ในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดในขั้นต่อไป

วิธีการทดลอง

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลฟักข้าว

นำตัวอย่างมาล้างให้สะอาดเช็ดให้แห้ง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด และส่วนของเนื้อในฟักข้าว และทำการวิเคราะห์ตามวิธีของ AOAC (2012)

การเตรียมตัวอย่างฟักข้าวเพื่อใช้ในการสกัดแคโรทีนอยด์

ผลฟักข้าวสดนำมาทำความสะอาดเช็ดให้แห้ง แบ่งส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดและเนื้อในออกจากกัน ชั่งตัวอย่างจำนวน 100 กรัม แล้วเกลี่ยตัวอย่างใส่ถาดให้ตัวอย่างหนาไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร จากนั้นเข้าตู้อบลมร้อนแบบถาดโดยใช้อุณหภูมิในการอบที่ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาร้อยละความชื้นทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งได้ความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 เมื่อได้ฟักข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 เมช เพื่อให้ได้ผงฟักข้าวที่มีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ (ดัดแปลงจาก AOAC, 2012; Mai *et al*, 2013)

การสกัดแคโรทีนอยด์

ดัดแปลงจากวิธีของ Kubola and Siriamornpun (2011) นำฟักข้าวแห้งน้ำหนัก 20 กรัม และตัวทำละลายผสมของ เฮกเซน: อะซีโตน: เอทานอล (500: 250: 250 v/v/v) ปริมาตรรวม 1000 มิลลิลิตร ผสมรวมกันและกวนสม่ำเสมอเป็นเวลา 30 นาที ในบีกเกอร์ที่หุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 150 มิลลิลิตร จะทำให้เห็นส่วนของสารละลายที่แยกชั้นออกจากกัน เก็บสารละลายส่วนบนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกทำการระเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40°C ความดัน 230 มิลลิบาร์ (สารสกัดควบคุม) สารสกัดที่ได้นำมาวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity ต่อไป สำหรับกลุ่มที่สองนำสารสกัดที่ได้ไปทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันต่อ

การทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน

ดัดแปลงจากวิธีของ AOAC (2012) และ ตรีชฎา (2551) สารสกัดที่ได้ 100 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยารวมกับสารละลายเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 5, 20, 40 ในขวดรูปชมพู่ที่ห่อหุ้มด้วยกระดาษฟอยล์ กวนผสมเป็นเวลา 1 นาที สำหรับการทำสะปอนนิฟิเคชันแบบร้อนนำไปบ่มในน้ำอุ่น 56°C เป็นเวลา 20 นาที ในระหว่างการบ่มปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยแผ่นให้ความเย็นเพื่อป้องกันการสูญเสียสารสกัดที่ระเหยเนื่องจากความร้อน จากนั้นนำสารสกัดมาบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องต่อจนครบ 2 ชั่วโมง สำหรับการทำสะปอนนิฟิเคชันแบบเย็น ให้นำสารสกัดที่ได้บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากบ่มสารสกัดให้เติม เฮกเซน 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายแยกชั้น นำสารละลายด้านบนกรองสบู่ออกด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 ทำการระเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40°C ความดัน 230 มิลลิบาร์ วิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity ต่อไป

การวัดค่าร้อยละความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ด้วย DPPH radical-scavenging activity

สารสกัด 0.1 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลาย DPPH ในเมทานอล 0.001 โมล ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ถูกนำมาบ่มไว้เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร (Kubola and Siriamornpun, 2011) ทำการคำนวณค่าร้อยละความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH โดย

$$\%\text{ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH} = [(A517_{\text{ที่ไม่มีสารสกัด}} - A517_{\text{จากสารสกัด}}) / A517_{\text{ที่ไม่มีสารสกัด}}] \times 100$$

การวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สกัดได้จากผลฟักข้าว

ดัดแปลงจากวิธีของ ตรีชฎา (2551) ชั่งสารสกัดที่ได้ 0.01 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเฮกเซนจนได้สารละลาย 50 มิลลิลิตร นำสารละลายใส่ลงใน Cuvette แก้ว และวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้เฮกเซนเป็น blank นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบความเข้มข้นกับกราฟมาตรฐานบีต้าแคโรทีน เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ (R^2=0.99)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม SPSS Version 12.

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟักข้าว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหุ้มเมล็ดและเนื้อในของฟักข้าว (Table 1) พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำถึงร้อยละ 92.93 และ 92.82 ตามลำดับ รองลงมาคือปริมาณของคาร์โบไฮเดรต 6.815 และ 6.950 กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่างสด ตามลำดับ สำหรับปริมาณไขมัน พบว่าปริมาณไขมันในเยื่อหุ้มเมล็ด (0.067 กรัมต่อ100 กรัมตัวอย่างสด) มีปริมาณมากกว่าในเนื้อในของฟักข้าว (0.002 กรัมต่อ100กรัมตัวอย่างสด) ซึ่งปริมาณไขมันที่แตกต่างกันอาจทำให้การเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันแตกต่างกันออกไป (Kopec *et al*., 2012)

Table 1 The proximate composition of aril and pericarp of fresh gac Fruit

Nutrition	Aril	Pericarp
water (%)	92.93±0.05	92.82±0.05
fat (g/100g of fresh sample)	0.067±0.04	0.002±0.01
protein (g/100g of fresh sample)	0.058±0.01	0.016±0.03
fiber (g/100g of fresh sample)	0.074±0.01	0.203±0.01
ash (g/100g of fresh sample)	0.056±0.01	0.015±0.01
carbohydrate (g/100g of fresh sample)	6.815±0.05	6.950±0.02

การทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดและเนื้อในของฟักข้าว

กระบวนการทำแห้งเป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการสกัดสารแคโรทีนอยด์ เพื่อใช้ในการรักษาตัวอย่างให้คงคุณภาพไม่เสื่อมเสียและจัดเก็บได้ง่าย (ศุภาพิชญ์ และคณะ, 2557) เมื่อทำแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดฟักข้าวด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 60°C (Figure 1) พบว่าในช่วงระยะแรกจนถึงชั่วโมงที่ 5 เยื่อหุ้มเมล็ดมีความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 54.55 เป็นร้อยละ 13.28 หลังจากนั้นความชื้นจึงลดลงเล็กน้อยจนไม่มีความ

เปลี่ยนแปลงได้ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 8.84 ใช้เวลาในการทำแห้งเป็นเวลา 15 ชั่วโมงต่อเนื่อง สำหรับการทำแห้งเนื้อในของฟักข้าวพบว่าในช่วง 3 ชั่วโมงแรกของการทำแห้งร้อยละความชื้นลดลงเพียงเล็กน้อยก่อนที่ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 61.40 เป็น 20.06 ในช่วงชั่วโมงที่ 3 - 4 เมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมง พบว่าความชื้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงได้ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 9.71 เปรียบเทียบได้จากในปี 2013 Mai *et al.* ได้ทำการศึกษาผลของการทำแห้งที่มีต่อค่าความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ และค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจากฟักข้าวพบว่า ฟักข้าวแห้งที่ความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 สารสกัดที่ได้ให้ค่าความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์มากที่สุด โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการทำแห้งหรือไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของฟักข้าวแห้งคือ 60°C

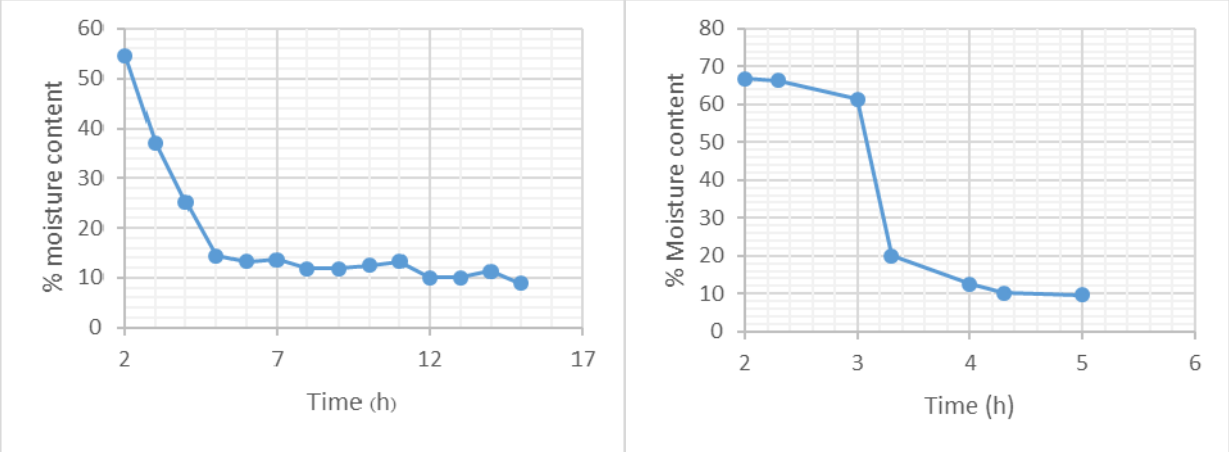


Figure 1 The percentage of moisture content that decrease during dry aril from 2-15 hrs. (left) and the percentage of moisture content that decrease during dry pericarp from 2-5 hrs. (right) at 60 °C in tray dryer.

ผลของปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันต่อความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity

แคโรทีนอยด์ที่มีอยู่ในอาหารโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปแคโรทีนอยด์อิสระหรือจับกับสารอื่นๆ เช่น ไขมัน หรือคลอโรฟิลล์ด้วยพันธะเอสเทอร์ โดยเฉพาะแคโรทีนอยด์ในกลุ่มแซนโทฟิลล์ เช่น ลูทีน ซีแซนทีน เป็นต้น เพื่อช่วยให้แยกแคโรทีนอยด์ได้ดียิ่งขึ้น จึงจำเป็นต้องทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันเพื่อกำจัดสารที่จับกับแคโรทีนอยด์ออกไป (Kimura *et al.*, 1990; Nhung *et al.*, 2010) สภาวะของการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันนั้นจะให้ผลแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาวะที่กำหนด เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และเวลาในการทำปฏิกิริยารวมไปถึงองค์ประกอบภายในของตัวอย่างที่ใช้ในการสกัด (Oliver and Palou, 2000) จากการทดลองการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันกับส่วนต่างๆของฟักข้าวแห้ง พบว่าผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อปริมาณของแคโรทีนอยด์สกัด (Table 2) กล่าวคือในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด การทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันมีผลทำให้ค่าความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์เพิ่มมากขึ้นเมื่อ

เทียบกับสารสกัดที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันแบบร้อนที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ให้ค่าปริมาณของแคโรทีนอยด์ถึง 0.748 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักฟักข้าวแห้ง และนอกจากนี้ยังพบว่าการทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของสารละลายเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 40 ให้สารสกัดที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้สูงสุดถึงร้อยละ 39.42

สำหรับในเนื้อในของฟักข้าวการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันที่ให้ผลดีที่สุดคือปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันแบบเย็นที่ใช้ความเข้มข้นของเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 40 สารสกัดที่ได้มีปริมาณของแคโรทีนอยด์เท่ากับ 0.826 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักฟักข้าวแห้ง ซึ่งเป็นปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการทำปฏิกิริยาอื่นๆ ($p<0.05$) และสารสกัดที่ได้จากสภาวะการสกัดนี้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ร้อยละ 37.68

Table 2 Carotenoid content and percentage of DPPH scavenging activity from gac fruits.

Type	Condition	Carotenoid content (ug/g)	DPPH scavenging activity (%)
Aril	Non-Saponification	0.659±0.09^{h}	30.13±0.50
	Hot-saponification (5% methanolic KOH)	0.748±0.09^{c}	19.91±2.77
	Hot-saponification (20% methanolic KOH)	0.739±0.09^{fg}	26.23±6.19
	Hot-saponification (40% methanolic KOH)	0.697±0.13^{h}	39.42±0.08
	Cold-saponification (5% methanolic KOH)	0.594±0.09^{lk}	11.28±0.68
	Cold-saponification (20% methanolic KOH)	0.608±0.09^{j}	12.43±1.10
	Cold-saponification (40% methanolic KOH)	0.743±0.07^{e}	13.83±3.50
Pericarp	Non-Saponification	0.646±0.09^{i}	23.06±4.91
	Hot-saponification (5% methanolic KOH)	0.719±0.07^{d}	28.25±1.09
	Hot-saponification (20% methanolic KOH)	0.758±0.13^{ef}	28.95±0.38
	Hot-saponification (40% methanolic KOH)	0.736 ±0.13^{g}	27.53±0.97
	Cold-saponification (5% methanolic KOH)	0.594 ±0.09^{k}	30.53±4.30
	Cold-saponification (20% methanolic KOH)	0.757 ±0.09^{b}	32.90±2.38
	Cold-saponification (40% methanolic KOH)	0.826±0.07^{a}	37.68±0.44

Means within the same column with different letters (a-k) are significantly different ($p<0.05$) by Duncan's multiple range tests (the average of three replication, n=3).

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดและเนื้อในของฟักข้าวพบว่า การทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันในเนื้อในของฟักข้าวช่วยให้ได้ปริมาณแคโรทีนอยด์ที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด เนื่องมาจากเนื้อในของฟักข้าวมีลูทีน ซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์ในกลุ่มแซนโทฟิลล์มากกว่าในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด (Kubola and Siriamornpun, 2011) เป็นผลให้เมื่อผ่านปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันแล้ว แคโรทีนอยด์ที่จับอยู่กับสารอื่นๆ ถูกปลดปล่อยออกมาจึงทำให้ได้ปริมาณแคโรทีนอยด์มากกว่าในส่วนเยื่อหุ้มเมล็ด ซึ่งอาจกล่าวได้อีกทางหนึ่งคือ สารแคโรทีนอยด์ส่วนใหญ่ในเยื่อหุ้มเมล็ด คือ ไลโคปีน และ บีต้าแคโรทีน ซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์ที่ไม่อยู่ในรูปเอสเทอร์กับไขมัน หรือองค์ประกอบอื่นๆ จึงทำให้เมื่อนำมาผ่านปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันจะเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่า และได้ปริมาณสารแคโรทีนอยด์ที่เพิ่มขึ้นในปริมาณที่น้อยกว่าส่วนเนื้อในนั่นเอง (Rodriguez-Amaya and Kimura, 2004) สำหรับค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่า ในเยื่อหุ้มเมล็ดมีค่ามากกว่า เนื่องจากในเยื่อหุ้มเมล็ดของฟักข้าวมีส่วนประกอบของสารฟีโนลิกและสารฟลาโวนอยด์จำนวนมาก ซึ่งสารเหล่านี้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดี (Kubola and Siriamornpun, 2011) จึงส่งผลต่อค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งในปฏิกิริยาแบบร้อนและแบบเย็นจะทำให้ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH จะเพิ่มขึ้นด้วย

สรุปผลการทดลอง

การทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันหลังการสกัดมีส่วนทำให้ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารสกัดเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสกัดสารแคโรทีนอยด์จากเนื้อในของฟักข้าวโดยสามารถสกัดแคโรทีนอยด์ได้มากถึง 0.826 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักฟักข้าวแห้ง สภาวะในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ รวมไปถึงองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ที่ได้จากสารสกัด ทั้งนี้การจะเลือกใช้สภาวะใดต้องพิจารณาจากวัตถุประสงค์ของการสกัดเป็นสำคัญ สำหรับสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการสกัดสารแคโรทีนอยด์ในฟักข้าวคือ การสกัดจากส่วนของเนื้อในของฟักข้าว โดยทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันแบบเย็น ที่ความเข้มข้นของเมทาโนลิกโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 40 จะเป็นผลให้ได้ความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2553. **เคมีอาหาร**. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ตรีชฎา อุทัยดา. 2551. **นมผงเสริมบีต้าแคโรทีนสกัดจากน้ำมันปาล์มดิบ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศุภาพิชญ์ บุญปู่, สาโรจน์ ศิริศันสนียกุล, วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์, ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์, มลนพรรษ สงพิมพ์, ดารารัตน์ มงคลการ และ กฤติยา เขื่อนเพชร. 2557. การพัฒนากรรมวิธีการแปรรูปฟักข้าวผง,

น.247-254. **การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52 (สาขาอุตสาหกรรมเกษตร)**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Amorim-Carrilho, K.T., A. Cepeda, C. Fente and P. Regal. 2014. Review of method for analysis of carotenoids. **Trends in Analytical Chemistry** 56: 49-73.

AOAC. 2012. **Official Method of Analysis of AOAC international.** 19th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Virginia.

Chan, M.C., S.H. Ho, D.J. Lee, C.Y. Chen, C.C. Huang and J.S. Chang. 2013. Characterization, extraction and purification of lutein produced by an indigenous microalga *Scenedesmus Obliquus* Cnw-N. **Biochemical Engineering Journal** 78: 24-31.

Kimura, M., D.B.R. Amaya and H.T. Godoy. 1990. Assessment of the saponification step in the quantitative determination of carotenoids and pro vitamins A. **Food Chemistry** 35: 187-195.

Kopec, R.E., J.L. Cooperstone, M.J. Cichon and S.J. Schwartz. 2012. Analysis methods of carotenoids, pp. 105-135. *In* Xu, Z. and L.R. Howard., eds. **Analysis of Antioxidant-Rich Phytochemicals**. Wiley-Blackwell, Oxford.

Kubola, J. and S. Siriamornpun. 2011. Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of Thai Gac (*Momordica Cochinchinensis* Spreng). **Food Chemistry** 127(3): 1138-1145.

Mai, H.C., V. Truong, B. Haut and F. Debaste. 2013. Impact of limited drying on *Momordica cochinchinensis Spreng*. aril carotenoids content and antioxidant activity. **Journal of Food Engineering** 118(4): 358-364.

Murillo, E., A.J. Meléndez-Martínez and F. Portugal. 2010. Screening of vegetables and fruits from Panama for rich sources of lutein and zeaxanthin. **Food Chemistry** 122(1): 167-172.

Nhung, D.T.T., P.N. Bung, N. T. Ha and T. K. Phong. 2010. Changes in lycopene and beta carotene contents in aril and oil of gac fruit during storage. **Food Chemistry** 121(2): 326-331.

Oliver, J., and A. Palou. 2000. Chromatographic determination of carotenoids in foods. **Journal of Chromatography A** 881: 543–555.

Rodriguez-Amaya D. B. and Mieko Kimura. 2004. **Harvest plus Handbook for Carotenoid Analysis**. 2th ed. HarvestPlus, Washington DC.

Vuong, L.T., A.A. Franke, L.J. Custer and S.P. Murphy. 2006. *Momordica Cochinchinensis* Spreng. (Gac) Fruit Carotenoids Reevaluated. **Journal of Food Composition and Analysis** 19(6-7): 664-668.

การห่อหุ้มเซลล์ของโปรไบโอติก *Lactobacillus plantarum* SKI19 และการประเมินความสามารถในการทนต่อสภาวะของกรดในกระเพาะอาหาร

Encapsulation of probiotic *Lactobacillus plantarum* SKI19 and evaluation of the gastrointestinal transit tolerance

อภิชาติ อู๋ไพจิตร[1*] สุธาศิน นิลเพชร[1] และ อ้อมใจ ช่อกุหลาบ[1]

Apichat Upaichit[1*], Sutasin Ninpetch[1] and Aomjai Chor-Kularb[1]

บทคัดย่อ

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการห่อหุ้มเซลล์ *Lactobacillus plantarum* SKI19 พบว่าการใช้โซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้น 3.0% มีการรอดชีวิตของเซลล์สูงสุดเท่ากับ 79.46% การใช้แคลเซียมคลอไรด์ที่ทุกความเข้มข้นมีการรอดชีวิตของเซลล์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้เม็ดเจลแข็งตัว พบว่าการขึ้นรูปเม็ดเจลที่ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที ส่งผลให้มีการรอดชีวิตของเซลล์เท่ากับ 69.60, 71.82 และ 76.25% ตามลำดับ ในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาเป็น 40, 50 และ 60 นาที ส่งผลให้มีการรอดชีวิตของเซลล์ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับที่ระยะเวลา 30 นาที เมื่อนำเซลล์ *Lb. plantarum* SKI19 มาห่อหุ้มในสภาวะที่เหมาะสม พบว่าที่อุณหภูมิห้องเมื่อเก็บรักษาเม็ดเจล 1 วัน มีการรอดชีวิตของเซลล์เท่ากับ 8.12 log CFU/ml ในขณะที่การเก็บรักษาเม็ดเจลเป็นเวลา 7 วัน มีการรอดชีวิตของเซลล์ลดลงต่ำกว่า 8.0 log CFU/ml ส่วนการเก็บรักษาเม็ดเจลเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่ามีการรอดชีวิตของเซลล์เท่ากับ 8.53 log CFU/ml ในขณะที่การเก็บรักษาเป็นเวลา 4 สัปดาห์ มีการรอดชีวิตของเซลล์ลดลงต่ำกว่า 8.0 log CFU/ml

ABSTRACT

A study was performed to determine the optimal encapsulation conditions for *Lactobacillus plantarum* SKI19. It was observed that encapsulation with 3.0% Na-alginate resulted in the highest cell survival of 79.46%. Whereas the various $CaCl_2$ concentrations tested did not yield statistical difference in the cell survivability. Encapsulation times of 10, 20 and 30 minutes resulted in cell survival of 69.60, 71.82 and 76.25%, respectively. However, further increase in encapsulation times (40, 50 and 60 minutes) did not yield statistical difference in cell survivability to that of 30 minutes. *Lb. plantarum* SKI19 was then treated under the optimized encapsulation conditions. It was observed that storage at room temperature for 1 day showed cell viability of 8.12 log CFU/ml, while longer storage times to 7 days at room temperature resulted in decreased cell viability to < 8.0 log CFU/ml. Storage temperature of 4°C showed cell viability of 8.53 log CFU/ml after 7 days. While storage times up to 4 weeks at 4°C resulted in decreased cell viability to < 8.0 log CFU/ml.

Key Words: *Lactobacillus plantarum*, probiotic, encapsulation, calcium-alginate gel bead, gastrointestinal transit tolerance

* Corresponding author; e-mail address: apichat.u@psu.ac.th

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

[1]Department of Industrial Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

บทนำ

ปัจจุบันโลกมีการเปลี่ยนแปลงไปมีวิวัฒนาการใหม่ๆ เข้ามามากมาย การดำเนินชีวิตของคนก็เปลี่ยนไป มีการแข่งขันกับเวลามากขึ้นจึงทำให้ความพิถีพิถันในการเลือกรับประทานอาหารน้อยลง รวมทั้งภาวะความเครียดส่งผลให้จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่รักษาสมดุลต่างๆ ของร่างกายถูกรบกวน ทำให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดโรคต่างๆ ตามมา อาทิ โรคมะเร็ง โรคหัวใจ โรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด และโรคท้องผูก รวมถึงโรคท้องร่วงซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร เป็นต้น จากความเสี่ยงของโรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นจึงมีความจำเป็นต้องได้รับจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์เข้าสู่ร่างกาย เพื่อเป็นการรักษาสภาพสมดุลของจุลินทรีย์ภายในร่างกาย ทำให้เกิดประโยชน์ต่อสุขภาพและช่วยให้ดำรงชีวิตอยู่ได้อย่างปกติสุข (วิเชียร, 2541) ซึ่งวิธีการหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจและศึกษากันมากคือการใช้จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์หรือโปรไบโอติก (probiotic) โปรไบโอติกเป็นจุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ของมนุษย์ช่วยสร้างความแข็งแรงและสามารถเพิ่มภูมิต้านทานให้แก่ร่างกายได้ (Guarner and Schaafsma, 1998) โดยกลุ่มของโปรไบโอติกที่สำคัญ ได้แก่ กลุ่มแบคทีเรียแลกติก เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่พบมากในอาหารหมัก เช่น แหนม ผักดอง ไส้กรอกเปรี้ยว นมเปรี้ยว และโยเกิร์ต เป็นต้น การมีชีวิตรอดของโปรไบโอติกเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากโปรไบโอติกที่มีชีวิตจะสามารถก่อตัวและเพิ่มจำนวนในลำไส้ใหญ่และให้ประโยชน์มากมายต่อสุขภาพของผู้ถูกอาศัย (host) (Ouwehand *et al*., 2002) โดยการรอดชีวิตของโปรไบโอติกขึ้นกับหลายปัจจัยทั้งปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง พีเอช สายพันธุ์ของจุลินทรีย์ ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวจุลินทรีย์ และกระบวนการแปรรูป เป็นต้น International Dairy Federation (DIF) กำหนดให้ผลิตภัณฑ์เสริมโปรไบโอติกจะต้องมีแบคทีเรียที่มีชีวิตอย่างน้อยที่สุด 10^8 CFU/g จนกระทั่งถึงวันที่บริโภคผลิตภัณฑ์นั้น ในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการเสริมแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติเป็นโปรไบโอติกเพื่อประโยชน์แก่ผู้บริโภคมักพบว่าแบคทีเรียส่วนใหญ่ที่เสริมลงไปไม่สามารถรอดชีวิตและเจริญได้เมื่อผ่านลงสู่ระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ เนื่องจากมีความสามารถในการทนต่อกรดและเกลือน้ำดีได้ต่ำ (Ouwehand and Salminen, 1998; Salminen *et al*., 2001)

การศึกษาในครั้งนี้จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการปกป้องเซลล์ของแบคทีเรีย *Lactobacillus plantarum* SKI19 ด้วยวิธีการห่อหุ้มเซลล์ (encapsulation) ด้วยเม็ดเจลของโซเดียมอัลจิเนต โดยศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการห่อหุ้มเซลล์และการรอดชีวิตของแบคทีเรียโปรไบโอติกในสภาวะจำลองของกระเพาะอาหาร รวมทั้งศึกษาถึงการเก็บรักษาเซลล์ที่ผ่านการห่อหุ้มในสภาวะต่างๆ ที่ช่วยเพิ่มการรอดชีวิตของเซลล์ที่ถูกห่อหุ้ม ทำให้แบคทีเรีย *Lb. plantarum* SKI19 ซึ่งเป็นแบคทีเรียโปรไบโอติกที่มีประโยชน์มีจำนวนที่เหมาะสมต่อการบริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการห่อหุ้มเซลล์และการรอดชีวิตของแบคทีเรียแลกติก

เตรียมเชื้อ *Lactobacillus plantarum* SKI19 ที่แยกได้จากไส้กรอกอีสาน โดยเลี้ยงในอาหาร MRS broth (Himedia, India) 50 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนเชื้อเจริญเข้าสู่ช่วง early stationary phase ซึ่งมีเซลล์ประมาณ 9 log CFU/ml เก็บเกี่ยวเซลล์โดยนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ล้างตะกอนเซลล์ 2 ครั้ง ด้วยสารละลาย 0.85% โซเดียมคลอไรด์ (Ajax Finechem, Australia) (น้ำหนักต่อปริมาตร) นำเซลล์ที่ได้ไปศึกษาผลของความ

เข้มข้นของสารโซเดียมอัลจิเนต(Fluka, Switzerland) (1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0% น้ำหนักต่อปริมาตร) ผลของความเข้มข้นของสารแคลเซียมคลอไรด์ (Ajax Finechem, Australia) (0.1, 0.2, 0.3 และ 0.5 M) และผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้เม็ดเจลแข็งตัว (10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที) โดยหยดเซลล์ที่แขวนลอยในสารละลายโซเดียมอัลจิเนตลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ด้วยเข็มฉีดยาขนาด 24G วางให้ความสูงของปลายเข็มฉีดยาห่างจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 5 เซนติเมตร และควบคุมความเร็วในการหยดสารแขวนลอยด้วย peristaltic pump ที่กำหนดอัตราเร็วในการปล่อยเม็ดเจล 11 มิลลิลิตรต่อนาที แยกเม็ดเจลโดยการกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 ล้างเม็ดเจลด้วยสารละลายเปปโตน (Himedia, India) ความเข้มข้น 0.1% (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่มีโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.85% และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 M 2 ครั้ง (Annan *et al.,* 2008) นำเม็ดเจลมาทดสอบคุณสมบัติการรอดชีวิตโดยชั่งเม็ดเจล 1 กรัม เติมลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.85% ที่ปรับพีเอชเป็น 2.5 และเติมเอนไซม์เปปซิน (Fluka, USA) ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 9 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้เซลล์อิสระที่ไม่ห่อหุ้มเป็นตัวอย่างควบคุม ตรวจหาการรอดชีวิตของเซลล์ด้วยเทคนิคการ Drop plate ลงบนอาหารแข็ง MRS รายงานผลเป็น log CFU/ml (Musikasang *et al.,* 2009) โดยคำนวณการรอดชีวิตตามสมการดังนี้

$$\text{Log survival (\%)} = (N/N_0) \times 100$$

เมื่อ N = log number of viable cells survived (CFU/ml)

N_0 = log number of initial viable cells inoculated (CFU/ml)

การศึกษาผลของการเก็บรักษาเซลล์ที่ผ่านการห่อหุ้ม

นำเม็ดเจลที่ผ่านและไม่ผ่านสภาวะจำลองของกรดในกระเพาะอาหารไปเก็บรักษาในสารละลายเปปโตนความเข้มข้น 0.1 % ที่มีโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.85% และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 M ที่บรรจุในขวดแก้ว Duran ปิดฝาสนิท และผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์ และที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 วัน วิเคราะห์จำนวนเซลล์ที่รอดชีวิตในเม็ดเจลด้วยเทคนิคการ Drop plate ลงบนอาหารแข็ง MRS รายงานผลเป็น log CFU/ml

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมทางสถิติคือ โปรแกรม SPSS (Statistical Packages for the Social Science) Version 10.0 ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (Analysis of variance; One-way ANOVA) และใช้การเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยในทุกการทดลองทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการห่อหุ้มเซลล์และการรอดชีวิตของแบคทีเรียแลกติก

1.1 ผลของความเข้มข้นของสารโซเดียมอัลจิเนต

จากการศึกษาระดับความเข้มข้นของวัสดุห่อหุ้มโดยใช้โซเดียมอัลจิเนตในการห่อหุ้มเชื้อ *Lb. plantarum* SKI19 ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 1.5, 2, 2.5 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าเซลล์อิสระของ *Lb. plantarum* SKI19 ที่ไม่ห่อหุ้มมีจำนวนการรอดชีวิตเท่ากับ 63.11 เปอร์เซ็นต์ โดยมีจำนวนเชื้อลดลงเหลือ 5.71 log CFU/ml จากปริมาณเชื้อเริ่มต้น 9.05 log CFU/ml เมื่อเปรียบเทียบการรอดชีวิตของ *Lb. plantarum* SKI19 ที่ห่อหุ้มด้วยโซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันภายหลังจากการผ่านสภาวะจำลองของกระเพาะอาหารที่มีพีเอช 2.5 และเอนไซม์เปปซิน 3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าการห่อหุ้มเซลล์ด้วยโซเดียมอัลจิเนตที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้มีการเหลือรอดของเซลล์ต่ำที่สุดโดยมีการรอดชีวิตเท่ากับ 75.45 เปอร์เซ็นต์ การห่อหุ้มเซลล์ด้วยโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้น 3.0 เปอร์เซ็นต์ มีการเหลือรอดของเซลล์สูงสุดเท่ากับ 79.46 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนเซลล์เริ่มต้น 8.94 log CFU/ml ลดลงเหลือ 7.10 log CFU/ml ดังแสดงในตารางที่ 1

Table 1 Effects of sodium alginate concentration on the survival of *Lactobacillus plantarum* SKI19 under gastrointestinal transit tolerance (pH 2.0 for 2 h at 37 ^{o}C)

Sodium alginate concentration (%)	Viable count (log CFU/ml)		Log survival (%)*
	Before	After	
Free cell	9.05±0.015	5.71±0.012	63.11^{d}
1.5	8.74±0.021	6.60±0.038	75.45^{c}
2.0	8.84±0.015	6.97±0.006	78.85^{b}
2.5	8.92±0.006	7.05±0.012	79.03^{b}
3.0	8.94±0.000	7.10±0.006	79.46^{a}

* Different letters (a - d) in the same column indicates significant differences ($p<0.05$).

ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Chandramoulia และคณะ (2004) ซึ่งศึกษาการห่อหุ้มเซลล์ *Lb. acidophilus* CSCC2400 ด้วยอัลจิเนต พบว่าเมื่อบ่มเม็ดเจลในสภาวะกรดในทางเดินอาหาร แบคทีเรียที่อยู่ภายในเม็ดเจลที่ใช้วัสดุตัวพยุงที่ความเข้มข้นสูงมีการรอดชีวิตได้สูงกว่าที่ความเข้มข้นของวัสดุตัวพยุงที่ต่ำกว่า โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอัลจิเนตจาก 0.75 เปอร์เซ็นต์ เป็น 1.0, 1.5, 1.8, 2.0 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จำนวนแบคทีเรียที่รอดชีวิตจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอัลจิเนตที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และจากการทดลองของ Mandal และคณะ (2006) ได้ห่อหุ้มเซลล์ *Lb. casei* NCDC-298 ด้วยอัลจิเนตความเข้มข้น 2.0, 3.0 และ 4.0 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเซลล์อิสระมีการรอดชีวิตน้อยกว่าเซลล์ที่ถูกห่อหุ้มในสภาวะกรดในทางเดินอาหาร และการห่อหุ้มเซลล์ด้วยอัลจิเนต 2.0 เปอร์เซ็นต์ มีจำนวนเซลล์ที่รอดชีวิตน้อยกว่าเซลล์ที่ห่อหุ้มด้วยอัลจิเนต 3.0 และ 4.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การที่ระดับความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยให้เซลล์ที่ห่อหุ้มมีการรอดชีวิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัลจิเนตเป็น supporting material ที่ความแข็งแรงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและลำดับของ β-D-mannuronic acid และ α-L-guluronic acid ที่ต่อกันด้วยพันธะ β-1,4 ความเข้มข้นของอัลจิเนตที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มจำนวนแขน (binding site) ที่ใช้จับกับ Ca^{2+} ทำให้ β-D-mannuronic

acid และ α-L-guluronic acid เกิดการจับกันแบบเชื่อมไขว้กับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ได้มากขึ้น ทำให้เพิ่มความแข็งแรงให้กับเม็ดเจลซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เซลล์รอดชีวิตได้มากขึ้น (Lee and Heo, 2000) อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตที่สูงขึ้นก็จะส่งผลต่อความหนืดของโซเดียมอัลจิเนตที่สูงขึ้นเช่นกันซึ่งยากต่อการผสมระหว่างเซลล์กับโซเดียมอัลจิเนต

1.2 ผลของความเข้มข้นของสารแคลเซียมคลอไรด์

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเม็ดเจลต่อการรอดชีวิตของ *Lb. plantarum* SKI19 ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.5 M พบว่า *Lb. plantarum* SKI19 ที่ห่อหุ้มด้วยโซเดียมอัลจิเนต 3.0 เปอร์เซ็นต์ และทำให้แข็งตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M ภายหลังจากผ่านสภาวะจำลองของกระเพาะอาหารจะมีการเหลือรอดของเซลล์ในปริมาณที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์มากกว่า 0.1 M พบว่า *Lb. plantarum* SKI19 มีจำนวนเซลล์รอดชีวิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 2) สอดคล้องกับการทดลองของ Chandramoulia และคณะ (2004) ที่ศึกษาถึงระดับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในการห่อหุ้มเซลล์ *Lb. acidophilus* CSCC 2400 และ *Lb. acidophilus* CSCC2409 ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 0.1, 0.2 และ 1.0 M ตามลำดับ พบว่าระดับความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่ออัตราการรอดชีวิตของเซลล์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นการเพิ่มปริมาณของ Ca^{2+} ซึ่งใช้ในการจับกับพอลิเมอร์ (polymer) โดยแคลเซียมไอออนจะเข้าไปจับทั้งสองแขน (binding sites) ของพอลิเมอร์หรือเรียกว่า cross-linking ทำให้พอลิเมอร์จับกันเป็นร่างแหจนขึ้นรูปเป็นเม็ดเจล อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความคงตัวของเม็ดเจลน้อยมากเมื่อแขนพอลิเมอร์จับกันครบทุกแขน ทำให้ Ca^{2+} ที่เหลือไม่มีโอกาสจับกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเม็ดเจลได้อีก (Tanaka *et al.*, 1984) จากการศึกษาพบว่าการใช้โซเดียมอัลจิเนตที่ความเข้มข้น 3.0 เปอร์เซ็นต์ และทำให้เม็ดเจลแข็งตัวในแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการห่อหุ้มเซลล์ *Lb. plantarum* SKI19

Table 2 Effects of calcium chloride concentration on the survival of *Lactobacillus plantarum* SKI19 under gastrointestinal transit tolerance (pH 2.0 for 2 h at 37 °C)

Calcium chloride concentration (M)	Viable count (log CFU/ml)		Log survival (%)*
	Before	After	
Free cell	9.14±0.017	5.76±0.026	63.35[b]
0.1	8.87±0.015	6.91±0.064	77.84[a]
0.2	8.88±0.010	6.91±0.015	77.85[a]
0.3	8.74±0.021	6.85±0.023	78.31[a]
0.5	8.76±0.030	6.83±0.023	77.93[a]

* Different letters (a - b) in the same column indicates significant differences ($p<0.05$).

1.3 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้เม็ดเจลแข็งตัว

นอกจากความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมคลอไรด์มีผลต่อการห่อหุ้มเซลล์แบคทีเรียแล้ว ความสามารถในการรอดชีวิตของแบคทีเรียที่อยู่ภายในเม็ดเจลยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่เม็ดเจลแข็งตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์อีกด้วย จากการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้เม็ดเจลแข็งตัวที่แตกต่างกันคือ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ในการขึ้นรูปเม็ดเจลของโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้น 3.0 เปอร์เซ็นต์ และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าการใช้ระยะเวลาที่ทำให้เม็ดเจลแข็งตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1 M นานขึ้น จะทำให้การรอดชีวิตของ *Lb. plantarum* SKI19 เพิ่มสูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามการทำให้เม็ดเจลแข็งตัวเป็นเวลา 30 นาที หรือมากกว่า พบว่าเซลล์มีการรอดชีวิตสูงขึ้นเมื่อผ่านการทดสอบในสภาวะของกระเพาะอาหารจำลอง แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่ระยะเวลา 30 นาที ซึ่งยังคงมีการรอดชีวิตสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ทำให้เม็ดเจลแข็งตัวเป็นเวลา 10 และ 20 นาที (ตารางที่ 3) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Chandramoulia และคณะ (2004) ที่ทำการศึกษาถึงผลของเวลาในการขึ้นรูปของเม็ดเจลต่อความสามารถในการรอดชีวิตของเซลล์ *Lb. acidophilus* CSCC 2400 และ *Lb. acidophilus* CSCC 2409 โดยขึ้นรูปเม็ดเจลในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นเวลา 5, 30, 60, 120 และ 180 นาที พบว่าแบคทีเรียในเม็ดเจลที่ทำให้แข็งตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1 M เป็นเวลา 30 นาที หรือที่เวลามากกว่า 30 นาที มีการรอดชีวิตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแบคทีเรียในเม็ดเจลที่ทำให้แข็งตัวเป็นเวลา 5 นาที ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ระยะเวลาในการทำให้เม็ดเจลแข็งตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีผลต่อการรอดชีวิตของแบคทีเรีย โดยเมื่อใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะทำให้เม็ดเจลมีความคงตัวและมีความแข็งแรงมากขึ้น และเมื่อนำเม็ดเจลไปบ่มที่สภาวะต่างๆ เม็ดเจลจะสามารถปกป้องเซลล์ที่อยู่ภายในได้ดีขึ้น จากการทดลองพบว่าการใช้โซเดียมอัลจิเนตที่ความเข้มข้น 3.0% ขึ้นรูปเม็ดเจลในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M และทำให้เม็ดเจลแข็งตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เป็นเวลา 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการห่อหุ้มเซลล์ *Lb. plantarum* SKI19

Table 3 Effects of encapsulation time on the survival of *Lactobacillus plantarum* SKI19 under gastrointestinal transit tolerance (pH 2.0 for 2 h at 37 ^{o}C)

Time (min)	Viable count (log CFU/ml)		Log survival (%)*
	Before	After	
Free cell	9.12±0.031	5.80±0.020	63.62^{d}
10	8.72±0.025	6.07±0.038	69.60^{c}
20	8.93±0.046	6.41±0.066	71.82^{b}
30	8.91±0.031	6.80±0.012	76.25^{a}
40	8.99±0.035	6.86±0.026	76.28^{a}
50	8.90±0.025	6.78±0.012	76.25^{a}
60	8.98±0.032	6.86±0.021	76.33^{a}

* Different letters (a - d) in the same column indicates significant differences ($p<0.05$).

2. การศึกษาผลของการเก็บรักษาเซลล์ที่ผ่านการห่อหุ้ม

การห่อหุ้มจัดเป็นเทคโนโลยีในการปกป้องตัวเซลล์ไว้ในเม็ดเจล hydrocolloid เพื่อช่วยรักษาความคงตัวของระดับจำนวนแบคทีเรียโปรไบโอติกในผลิตภัณฑ์และระบบทางเดินอาหาร (Rao *et al.,* 1998) จากคุณประโยชน์ดังกล่าวทำให้ในปัจจุบันพบว่าอาหารที่มีการเสริมโปรไบโอติกนิยมใช้เซลล์ที่ผ่านการห่อหุ้ม จึงจำเป็นต้องศึกษาถึงอายุการเก็บรักษาเม็ดเจลที่ทำให้ระดับความคงตัวของเม็ดเจลและระดับปริมาณเชื้อโปรไบโอติกในผลิตภัณฑ์มีปริมาณไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด จากการศึกษาเซลล์ *Lb. plantarum* SKI19 ที่ถูกห่อหุ้มและการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) และที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิห้องเม็ดเจลที่ไม่ผ่านสภาวะจำลองของกระเพาะอาหารสามารถเก็บรักษาไว้ได้เพียง 1 วัน โดยมีการรอดชีวิตของเซลล์ 8.12 log CFU/ml ในขณะที่การเก็บรักษาเม็ดเจลเป็นเวลา 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 วัน ปริมาณเซลล์ลดลงต่ำกว่า 8.0 log CFU/ml คือ 7.70, 7.01, 6.75, 5.99, 5.42 และ 5.12 log CFU/ml ตามลำดับ สำหรับเม็ดเจลภายหลังจากการผ่านสภาวะจำลองของกระเพาะอาหารและเก็บรักษาเป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 วัน พบว่าปริมาณเซลล์ลดลงต่ำกว่า 8.0 log CFU/ml คือ 6.16, 6.00, 5.36, 5.03, 5.00, 4.40 และ 3.41 log CFU/ml ตามลำดับ (ภาพที่ 1)

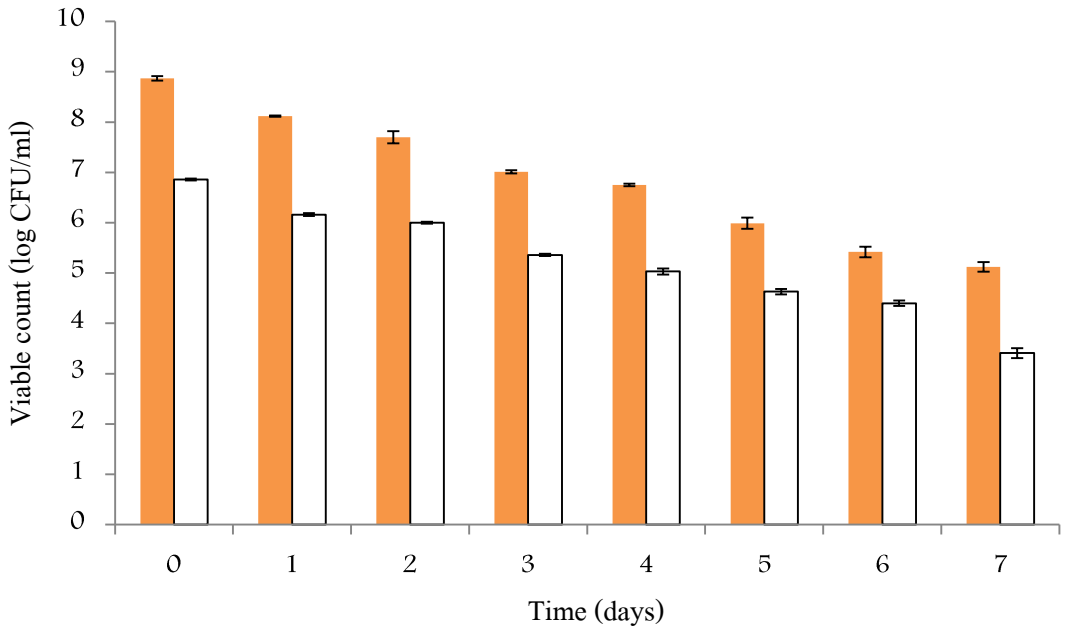


Figure 1 Effects of storage condition on the survival of alginate-encapsulated *Lactobacillus plantarum* SKI19 before (■) and after (□) treated with gastrointestinal transit tolerance (pH 2.0 for 2 h at 37°C) and stored at room temperature

ส่วนการเก็บรักษาเม็ดเจลที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่าเม็ดเจลที่ไม่ผ่านสภาวะจำลองของกระเพาะอาหารสามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ โดยมีการรอดชีวิตของเซลล์เท่ากับ 8.53 log CFU/ml ในขณะที่การเก็บรักษาเป็นเวลา 2, 3 และ 4 สัปดาห์ พบว่าปริมาณเซลล์ลดลงต่ำกว่า 8.0 log CFU/ml คือ 7.95, 7.73 และ 7.37 log CFU/ml ตามลำดับ ในขณะที่การเก็บรักษาเม็ดเจลภายหลังจากการผ่านสภาวะจำลองของกระเพาะอาหาร พบว่าเมื่อเก็บรักษาเม็ดเจลเป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์ ปริมาณเซลล์ลดลงต่ำกว่า 8.0 log

CFU/ml คือ 6.10, 5.88, 5.36 และ 5.04 log CFU/ml ตามลำดับ (ภาพที่ 2) สาเหตุที่ปริมาณเซลล์ *Lb. plantarum* SKI19 ลดต่ำลงกว่า 8.0 log CFU/ml เนื่องจากการที่อัลจิเนตอยู่ในสภาวะที่มีความเป็นกรดต่ำมากๆ จนมีค่า pKa ต่ำกว่า β-D-mannuronic acid และ α-L-guluronic acid (3.6 และ 3.7 ตามลำดับ) จะส่งผลให้อัลจิเนตเปลี่ยนเป็นกรดอัลจินิกซึ่งจะไม่มีคุณสมบัติในการจับกับ Ca^{2+} ทำให้เม็ดเจลไม่มีความคงตัวและปลดปล่อยเซลล์แบคทีเรียออกมานอกเม็ดเจล (Doumeche *et al.*, 2004) นอกจากนี้อุณหภูมิในการเก็บรักษาเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการรอดชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยจากการทดลองพบว่าการเก็บรักษาเชื้อไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (4 องศาเซลเซียส) จะทำให้เชื้อมีอัตราการรอดชีวิตสูงกว่าการเก็บรักษาเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้อง สอดคล้องกับการทดลองของ Costa และคณะ (2000) ที่พบว่าเซลล์ของ *Pentoea agglomerans* strain CPA-2 ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีปริมาณเชื้อลดลงเพียง 0.5 log CFU/ml ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 90 วัน ในขณะที่การเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ปริมาณเชื้อลดลง 3.0 log CFU/ml ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 28 วัน และจากการศึกษาของ Rodrigues และคณะ (2011) พบว่าสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการเก็บรักษาเซลล์ที่ห่อหุ้มจะมีอิทธิพลสำคัญต่อความคงตัวของเซลล์ในการเก็บรักษา และการเคลือบเม็ดเจลอีกหนึ่งชั้นก็สามารถช่วยรักษาปริมาณเซลล์ในเม็ดเจลได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นแบคทีเรียโปรไบโอติก *Lb. plantarum* SKI19 ที่ผ่านการห่อหุ้มและเก็บรักษาไว้ในสารละลายเปปโตนความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่มีโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 M ควรมีการเคลือบผิวเม็ดเจลก่อนนำไปศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาเพื่อเพิ่มปริมาณการเหลือรอดของเซลล์ และความคงตัวในระหว่างการเก็บรักษาอันจะมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

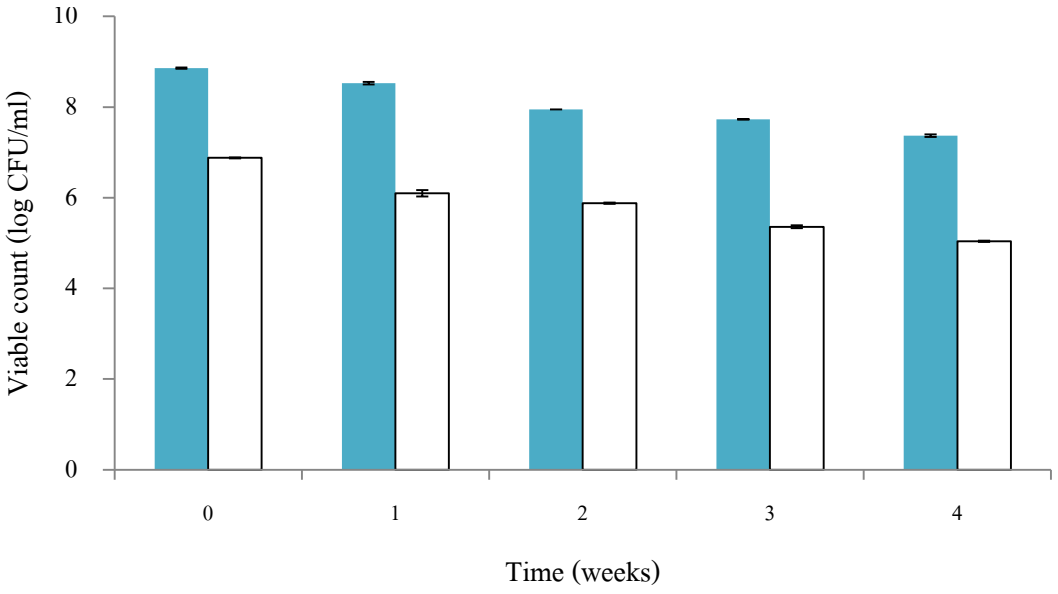


Figure 2 Effects of storage condition on the survival of alginate-encapsulated *Lactobacillus plantarum* SKI19 before (■) and after (□) treated with gastrointestinal transit tolerance (pH 2.0 for 2 h at 37°C) and stored at 4°C

สรุป

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการห่อหุ้มเซลล์แบคทีเรียโปรไบโอติก *Lb. plantarum* SKI19 เพื่อประเมินความสามารถในการทนต่อสภาวะจำลองของกระเพาะอาหาร พบว่าการห่อหุ้มเซลล์โดยใช้สารโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้น 3.0 เปอร์เซ็นต์ สารแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M และใช้ระยะเวลาในการห่อหุ้ม 30 นาที แบคทีเรียมีการรอดชีวิตในสภาวะจำลองของกระเพาะอาหารสูงที่สุด (76.25%) และเมื่อนำเซลล์ *Lb. plantarum* SKI19 ที่ผ่านการห่อหุ้มในสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวมาศึกษาสภาวะและระยะเวลาการเก็บรักษาที่เหมาะสม พบว่าการเก็บรักษาเม็ดเจลที่อุณหภูมิห้องสามารถเก็บรักษาเม็ดเจลได้เพียง 1 วัน โดยยังคงมีปริมาณเซลล์ 8.12 log CFU/ml ในขณะที่การเก็บรักษาเม็ดเจลที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถเก็บรักษาเม็ดเจลได้เป็นเวลา 7 วัน โดยยังคงมีปริมาณเซลล์ 8.53 log CFU/ml หลังจากนั้นเม็ดเจลจะไม่มีความคงตัวและจำนวนจุลินทรีย์จะลดลงต่ำกว่า 8.0 log CFU/ml ซึ่งถือเป็นระดับต่ำสุดของปริมาณโปรไบโอติกมีชีวิตที่ยังคงก่อให้เกิดคุณประโยชน์ต่อร่างกายของผู้บริโภค

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย และภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

วิเชียร ลีลาวัชรมาศ. 2541. โปรไบโอติกส์: อาหารสุขภาพสำหรับมนุษย์และสัตว์ ตอนที่ 1. **วารสารจาร์พาร์**. 41: 50-53.

Annan, N.T., Borza, A.D. and Hansen, L.T. 2008. Encapsulation in alginate-coated gelatin microspheres improves survival of the probiotic *Bifidobacterium adolescentis* 15703T during exposure to simulated gastro-intestinal conditions. **Food Research International** 41: 184-193.

Chandramoulia, V., Kailasapathya, K., Peirisp, P. and Jones, M. 2004. An improved method of microencapsulation and its evaluation to protect *Lactobacillus* spp. in simulated gastric condition. **Journal of Applied Microbiology** 56: 27-35.

Costa, E., Usall, J., Teixido, N., Garcia, N. and Vinas, I. 2000. Effect of protective agents, rehydration media and initial cell concentration on viability of *Pantoea agglomerans* strain CPA-2 subjected to freeze-drying. **Journal of Applied Microbiology** 89: 793-800.

Doumeche, B., Kuppers, M., Stapf, S., Blumich, B., Hartmeier, W. and Ansorge-Schumacher, M.B. 2004. New approaches to visualization, quantification and explanation of acid-induced water loss from Ca-alginate hydrogel beads. Journal of Microencapsulation. 21: 565-573.

Guarner, F. and Schaafsma, G.J. 1998. Probiotics. **International Journal of Food Microbiology** 39: 237-238.

Lee, K.Y. and Heo, T.R. 2000. Survival of *Bifidobacterium longum* immobilized in calcium alginate beads in stimulated gastric juices and bile salt solution. Applied and Environmental Microbiology. 66: 869-873.

Mandal, S., Puniya, A.K. and Singh, K. 2006. Effect of alginate concentrations on survival of microencapsulated *Lactobacillus casei* NCDC-298. **International Dairy Journal** 16: 1190-1195.

Musikasang, H., Tani, A., H-kittikun, A. and Maneerat, S. 2009. Probiotic potential of lactic acid bacteria isolated from gastrointestinal digestive tract. **World Journal of Microbiology and Biotechnology** 25: 1337-1345.

Ouwehand, A.C. and Salminen, S.J. 1998. The health effects of cultured milk products with viable and non-viable bacteria. **International Dairy Journal** 8: 749-758.

Ouwehand, A.C., Salminen, S. and Isolauri, E. 2002. Probiotics: an overview of beneficial effects. **Antonie van Leeuwenhock** 82: 279-289.

Rao, A.V., Shiwnavain, N. and Maharaj, I. 1989. Survival of microencapsulated *Bifidobacterium pseudolongum* in simulated gastric and intestinal juiced. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal** 22: 45-346.

Rodrigues, D., Sousa, S., Gomes, A.M., Pintado, M.M., Silva, J.P., Costa, P., Amaral, M.H., Rocha-Santos, T. and Freitas, A.C. 2011. Storage stability of *Lactobacillus paracasei* as free cells or encapsulated in alginate-based microcapsules in low pH fruit juices. **Food and Bioprocess Technology** 4: 328-335.

Salminen, S. 2001. Human studies on probiotics: aspects of scientific documentation. **Scandinavian Journal of Food and Nutrition transition** 45: 8-12.

Tanaka, T. Umekawa, H., Ohmura, T. and Hidaka, H. 1984. Calcium-dependent hydrophobic chromatography of calmodulin, S-100 protein and troponin-C. **Biochimica et Biophysica Acta** 787: 158-164.

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดงจากเชื้อรา *Monascus purpureus* ในเครื่องโคจิโดยใช้วิธีทากูชิ

Optimization Condition for Red Pigment Production from *Monascus purpureus* in Koji Machine by the Taguchi Method

วีระสิทธิ์ กัลยากฤต[1*] ปวีณา สุขสำราญ[1] ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์[1] มังกร โรจน์ประภากร[1] และ วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา[1]

Werasit Kanlayakrit[1*], Paweena Suksamran[1], Pramuk Parakulsuksatid[1], Mangkorn Rodprapakorn[1] and Wirat Vanichsriratana[1]

บทคัดย่อ

ข้าวแดงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักในสภาวะอาหารแข็งด้วยเชื้อรา *Monascus* sp. ซึ่งจะสร้างสารสีทำให้เมล็ดข้าวเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม สามารถนำไปใช้เป็นสีผสมอาหารที่มาจากธรรมชาติได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดงในเครื่องโคจิจากเชื้อรา *Monascus purpureus* ด้วยวิธีทากูชิ โดยการใช้ข้าวเจ้าสายพันธุ์ชัยนาทเป็นวัตถุดิบ และเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 10 วัน ในสภาวะที่แตกต่างกันตามการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ จากนั้นวัดปริมาณสารสีแดงโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดง คือการเพาะเลี้ยงเชื้อราที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 45 ใช้ข้าวปริมาณ 3 กิโลกรัม และบ่มที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ซึ่งที่สภาวะดังกล่าว สามารถคำนวณปริมาณสารสีแดงจากสมการทากูชิได้เท่ากับ 212.01 Optical Density (OD) Units/กรัมน้ำหนักแห้ง และสอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลการทดลองจากการยืนยันผลที่ได้ค่าเท่ากับ 221.20 ± 6.95 OD Units/กรัมน้ำหนักแห้ง

ABSTRACT

Red yeast rice is a fermented rice product of *Monascus* sp. by solid-state fermentation. The fungus can produce red pigment resulted in deep red rice grain which have been utilized as a natural food coloring agent. The objective of this study was to optimize condition for red pigment production in Koji machine from *Monascus purpureus* by Taguchi method. The fermentation was carried out for 10 days using Chainat rice variety as substrate under various conditions of experimental Taguchi method. The red pigment was quantified by measuring the absorbance of red extract at 500 nanometers. The results showed that the optimal condition of red pigment production occurred at air velocity of 8.5 m/s, 45% initial moisture content, 3 kg of rice as substrate and 27 °C of incubation temperature. From this optimal condition, the predicted value of red pigment yield by Taguchi model was 212.01 Optical Density (OD) Units/gram dry weight, whereas the confirmation experiment achieved with the red pigment yield of 221.20 ± 6.95 OD Units/gram dry weight.

Key Words: red pigment production, *Monascus purpureus*, Koji machine, Taguchi method

* Corresponding author; e-mail address: fagiwrk@ku.ac.th

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ข้าวแดง (Red yeast rice) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักในสภาวะอาหารแข็ง (solid-state fermentation) ด้วยเชื้อรา *Monascus* sp. โดยใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบ เชื้อราจะเจริญบนเมล็ดข้าวนึ่งได้ สามารถย่อยข้าวให้นุ่ม ในขณะเดียวกันจะสร้างสารให้สีทำให้เมล็ดข้าวเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม สามารถนำไปใช้เป็นสีผสมอาหารที่มาจากธรรมชาติได้ เพื่อการแต่งสี ทำให้อาหารดูมีสีสัน และน่ารับประทานมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ข้าวแดงมีชื่อเรียกต่างกันตามท้องถิ่น เช่น ชาวจีนเรียกว่า อังคัก (Angkak, Angkhak) หรือ อังคา (Anka) ชาวญี่ปุ่นเรียกว่า เบนิ-โคจิ (Beni-koji) หรือ อังคา-โคจิ (Anka-koji) (อรัญ และคณะ, 2531) ข้าวแดงได้รับความสนใจมากขึ้นในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากได้มีการนำข้าวแดงไปใช้ประโยชน์มากมาย ซึ่งจะนิยมใช้ข้าวแดงเป็นส่วนประกอบในการปรุงแต่งสี และกลิ่นในอาหาร ทดแทนการใช้สารไนเตรตและไนไตรต์ในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์เพื่อคุณภาพที่ดีขึ้น เช่น แหนม ไส้กรอก ไส้กรอกเปรี้ยว ซาลามิ ปลาแป้งแดง เต้าหู้ยี้ และไวน์แดง (Faber *et al.*, 1993; Hamano and Kilikian, 2006) นอกจากนี้ข้าวแดงมีการนำไปใช้ประโยชน์ทางยา โดยพบสรรพคุณทางยาของข้าวแดงจะช่วยให้ระบบการย่อยและระบบไหลเวียนโลหิตดีขึ้น (Heber *et al.*, 1999) สำหรับกรรมวิธีในการผลิตข้าวแดงนั้น คุณภาพของข้าวแดงที่ผลิตได้จะมีความแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาวะในการผลิต นอกจากนี้การผลิตสารสีแดงในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ข้าวแดงในระดับอุตสาหกรรมของประเทศไทยยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ข้าวแดงที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมอาหาร ส่วนใหญ่จะมีการนำเข้ามาจากประเทศจีน และงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการผลิตข้าวแดงในระดับห้องปฏิบัติการ ทำให้การผลิตข้าวแดงในปริมาณมากโดยที่เชื้อราสามารถสร้างสารสีแดงมากที่สุดมีความสำคัญ ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดงจากเชื้อรา *M. purpureus* ในเครื่องโคจิ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ ซึ่งเป็นการทดลองที่สามารถศึกษาปัจจัยหลายๆ ปัจจัยพร้อมกัน เพื่อหาผลกระทบของปัจจัย และกำหนดค่าในการทดลองมากที่สุด โดยผลการทดลองของข้อมูลดิบจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปอัตราส่วนของ signal to noise (S/N Ratio) ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการหาเป้าหมายที่ถูกต้องเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (optimize) วิธีทากูชิจะช่วยลดจำนวนของชุดการทดลอง ทำให้ประหยัดเวลา และลดต้นทุนในการทดลอง (Roy, 2001)

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมเชื้อรา

การเตรียมกล้าเชื้อรา

ถ่ายเชื้อราบริสุทธิ์ *Monascus purpureus* โดยใช้เข็มเขี่ยบริเวณขอบด้านนอกโคโลนีมาวางบนอาหารแข็งเอียง Potato Dextrose Agar (PDA) (Becton Dickinson and Company, USA) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน จากนั้นนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อเป็น stock culture

การเตรียมทาเนโคจิ

นำข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาท 50 กรัม มาล้างทำความสะอาดแล้วแช่น้ำ 6-8 ชั่วโมง สะเด็ดน้ำออกจากข้าวโดยตั้งทิ้งในตะแกรงประมาณ 5 นาที บรรจุลงในฟลาสก์ (Erlenmeyer flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น

เพื่อปรับความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 40 โดยการวิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1990) จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วถ่ายเชื้อราบริสุทธิ์ *M. purpureus* โดยตัดชิ้นวุ้นขนาดประมาณ 0.5x0.5 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น ลงในข้าว นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 29-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ระหว่างการหมักจะต้องเขย่าฟลาสก์ทุกวัน เพื่อให้อากาศและทำให้เชื้อรากระจายตัวได้ดี

การสกัดและวัดปริมาณสารสีแดง

สกัดสารสีแดง โดยนำข้าวแดงที่ได้จากการเพาะเลี้ยงมาอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบดเป็นผง จากนั้นนำผงข้าวแดง 1 กรัม ผสมกับเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 จำนวน 5 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นพักทิ้งไว้ 15 นาที แล้วนำมากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 นำส่วนที่กรองได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้คูณด้วยค่า dilution factor จะได้ค่าปริมาณสารสีแดง รายงานผลเป็น OD Unit/กรัมน้ำหนักแห้ง (ดัดแปลงจาก Yongsmith *et al*., 2000; Babitha *et al*., 2007)

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดงในเครื่องโคจิโดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ (Taguchi method)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตสารสีแดง ซึ่งมีทั้งหมด 4 ปัจจัยโดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังแสดงใน Table 1 จากนั้นนำมาออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ โดยใช้ Orthogonal array (OAs) แบบ L-9 (3^4) ดังนั้นจึงได้การทดลองทั้งหมด 9 การทดลอง ประกอบด้วยจำนวนการทดลองที่ขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัย ดังแสดงใน Table 2 ซึ่งการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธีทากูชิจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Qualitek-4 (version 17.1.0) (Roy, 2001)

การเพาะเลี้ยงเชื้อราในเครื่องโคจิตามสภาวะที่ออกแบบไว้

การเพาะเลี้ยงเชื้อราเพื่อผลิตสารสีแดงในเครื่องโคจิ ดำเนินการตามสภาวะต่างๆ ที่ออกแบบไว้ โดยนำข้าวเจ้าพันธุ์ชัยนาทมาล้างทำความสะอาดแล้วแช่น้ำ 6-8 ชั่วโมง สะเด็ดน้ำออกจากข้าวโดยตั้งทิ้งในตะแกรงประมาณ 5 นาที บรรจุลงในถุงพลาสติกชนิดทนร้อนแล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับความชื้นเริ่มต้นตามการทดลองที่วางแผนไว้ จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วจึงนำข้าวไปใส่ในตะแกรงขนาด 45x45x15 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีผ้าขาวบางรองในเครื่องโคจิ (SIS Monthontech, Thailand) ผสมกับทาเนโคจิที่เตรียมไว้ปริมาณร้อยละ 5 (w/w) คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วปิดด้วยผ้าขาวบาง นอกจากนี้จะต้องมาพลิกหรือเกลี่ยโคจิเพื่อให้อากาศและทำให้เชื้อรากระจายตัวได้ดี ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 10 วัน

การทดสอบการผลิตสารสีแดงที่สภาวะการเพาะเลี้ยงในเครื่องโคจิโดยใช้สภาวะที่เหมาะสม

ดำเนินการโดยทำการทดลองซ้ำการผลิตสารสีแดงโดยเลี้ยงในเครื่องโคจิภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ และนำข้าวแดงที่สภาวะเหมาะสมนี้มาสกัดและวัดปริมาณสารสีแดง โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ เพื่อยืนยันผลการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าว

Table 1 Factors and their levels for red pigment production in Koji machine

Factors	Levels		
	1	2	3
A: Air velocity (m/s)	5.5	7	8.5
B: Initial moisture content (%)	45	50	55
C: Amount of rice (kg)	3	5	7
D: Temperature (°C)	27	30	33

Table 2 L-9 (3^4) Orthogonal Array

Experiments	Factor			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดงในเครื่องโคจิ

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดงในเครื่องโคจิด้วยวิธีทากูชิ ดำเนินการโดยเพาะเลี้ยงเชื้อรา *M. purpureus* ในเครื่องโคจิตามสภาวะต่างๆ ที่ออกแบบไว้ทั้งหมด 9 การทดลอง เป็นเวลา 10 วัน โดยปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองจะมาจากความสามารถของเครื่องโคจิที่สามารถควบคุมได้ โดยจะเลือกค่าที่ระดับต่ำสุด ปานกลาง และสูงสุด รวมทั้งจากสภาวะที่มีการศึกษามาจากระดับห้องปฏิบัติการ จากนั้นเป็นการวิเคราะห์หาสภาวะที่ดีที่สุด โดยแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของ Signal

to Noise (S/N Ratio) ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการหาเป้าหมายที่ถูกต้องเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ สามารถคำนวณ S/N Ratio เมื่อใช้เกณฑ์ค่าที่มากกว่าให้ผลดีกว่า (Larger-the-better-type) จากสมการ

$$S/N\ Ratio = -10\ Log_{10}(MSD)$$

โดยที่ค่า MSD คำนวณจากสมการ $MSD = (1/Y_1^2 + 1/Y_2^2 + 1/Y_3^2 + \ldots) / N$ เมื่อ Y คือ ค่าการทดลองที่ได้ในแต่ละชุดทดลองของการทดลอง (experiment) และ N คือ จำนวนชุดทดลองในแต่ละการทดลอง (Roy, 2001)

การเพาะเลี้ยงเชื้อราเพื่อผลิตสารสีแดง เชื้อราจะสามารถเจริญเติบโตบนเมล็ดข้าวนึ่งได้ สามารถย่อยข้าวให้นุ่ม ในขณะเดียวกันจะสร้างสารให้สีทำให้เมล็ดข้าวเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม ทำให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ข้าวแดง จากนั้นก็จะนำข้าวแดงไปหาปริมาณสารสีแดงโดยการสกัดด้วยเอทานอล แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่า การทดลองที่ 1 สามารถสร้างสารสีแดงได้มากที่สุด และมีค่า S/N ratio เท่ากับ 209.60 ± 16.41 OD Units/กรัมน้ำหนักแห้ง และ 46.38 ตามลำดับ โดยที่การทดลองนี้เป็นสภาวะการเพาะเลี้ยงที่ความเร็วลม 5.5 เมตรต่อวินาที ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 45 ใช้ข้าวปริมาณ 3 กิโลกรัม และบ่มที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงดัง Table 3 ทั้งนี้เนื่องจากการเพาะเลี้ยงเชื้อราเพื่อผลิตสารสีแดงในเครื่องโคจิ ซึ่งเป็นสภาวะที่ค่อนข้างอยู่ในระบบปิด อากาศจะหมุนวนอยู่ในภายในเครื่อง นอกจากนี้เครื่องโคจิสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ และปรับความเร็วลมในการเป่าให้อากาศ เพื่อช่วยพาความร้อนที่สะสมในระบบ ทำให้ไม่เกิดการสะสมความร้อนมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญของเชื้อรา ดังนั้น เชื้อราจะสามารถผลิตสารสีแดงได้ในปริมาณมากจะเกิดขึ้นกับสภาวะที่ความชื้นเริ่มต้นของข้าวต้องอยู่ในระดับต่ำ แต่ไม่ได้ต่ำเกินไปจนการถ่ายเทมวลสารอาหารไปยังเชื้อรานั้นไม่มีประสิทธิภาพ (Laukerics *et al*., 1984) ซึ่งในการทดลองนี้มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 45 มีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Palo *et al*. (1960) ที่รายงานว่าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 50 ให้ผลดีต่อการสร้างสีของ *M. purpureus* นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงเชื้อราที่ความชื้นมากเกินไปนั้นเชื้อรา *M. purpureus* จะผลิตสารสีได้ปริมาณน้อย แต่จะสร้างเอนไซม์กลูโคแอมีเลสมาก และเกิดการสะสมกลูโคสที่ยับยั้งการสร้างสารสี (กังสดาลย์, 2538) และที่ความชื้นเริ่มต้นมากเกินไปทำให้สับสเตรตจับเป็นก้อนติดกันระหว่างการเพาะเลี้ยงทำให้การถ่ายเทของอากาศไม่ดี (Babitha *et al*., 2007) การใช้ปริมาณข้าว 3 กิโลกรัม เป็นปริมาณของวัตถุดิบและความหนาของชั้นหมักที่เหมาะสมต่อการไหลเวียนของอากาศ และการบ่มที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ดีต่อกิจกรรมของเชื้อราระหว่างการหมัก เพราะในระหว่างการหมักในสภาพอาหารแห้งจะเกิดการสะสมความร้อนที่ถูกผลิตขึ้นในระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะในช่วง log phase เมื่อความร้อนถูกสะสมมากขึ้นจะก่อให้เกิดปัญหาต่อการหมักเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม (วราวุฒิ และรุ่งนภา, 2532)

จากการทดลองทั้งหมด 9 ทดลองทำให้สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อผลิตสารสีแดงได้โดยวิธีทากูชิ ซึ่งตัดสินจากค่า S/N Ratio ของปัจจัยในแต่ละระดับการทดลอง โดยค่าที่มากกว่าให้ผลดีกว่า (Larger-the-better-type) ซึ่งสภาวะที่ได้จะเป็นสภาวะที่มีปริมาณสารสีแดงสูงที่สุด ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสม คือ สภาวะการเพาะเลี้ยงเชื้อราที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที (A3) ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 45 (B1) ใช้ข้าวปริมาณ 3 กิโลกรัม (C1) และบ่มที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส (D1) ดังแสดงใน Figure 1

Table 3 Red pigment yield and S/N ratio by Taguchi design

Experiments	Air velocity (m/s)	Initial moisture content (%)	Amount of rice (kg)	Temperature (°C)	Red pigment yield (OD Units/g dry weight)	S/N ratio
1	5.5	45	3	27	209.60 ± 16.41	46.38
2	5.5	50	5	30	94.76 ± 8.71	39.46
3	5.5	55	7	33	18.56 ± 7.41	23.86
4	7	45	5	33	110.13 ± 8.03	40.79
5	7	50	7	27	98.64 ± 7.84	39.82
6	7	55	3	30	45.17 ± 6.77	32.9
7	8.5	45	7	30	118.57 ± 7.94	41.44
8	8.5	50	3	33	126.17 ± 10.94	41.95
9	8.5	55	5	27	85.63 ± 11.48	38.49

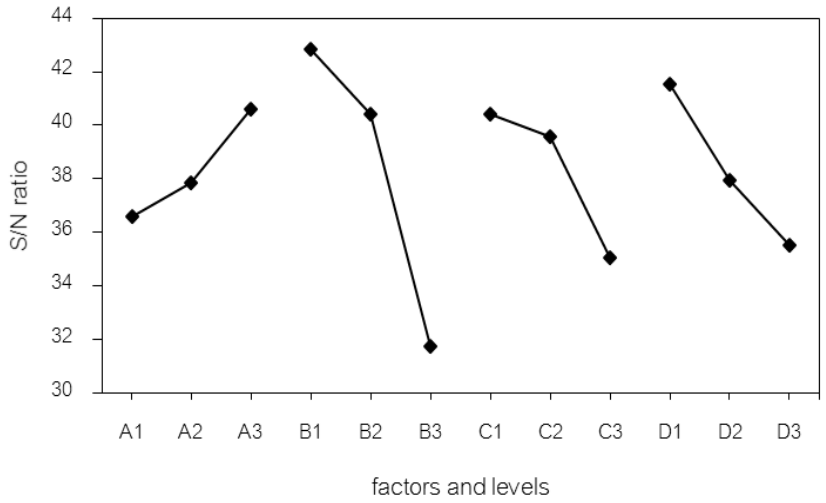


Figure 1 Mean of S/N ratio of factors and levels

Remark A, B, C and D represent to Factor (Table 1)

1, 2, and 3 represent to Level (Table 1)

ผลการทดลองยืนยันสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตสารสีแดงจากการออกแบบและทดลองจริง

สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดง คือ สภาวะการเพาะเลี้ยงที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที (A3) ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 45 (B1) ใช้ข้าวปริมาณ 3 กิโลกรัม (C1) และบ่มที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส (D1)

ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่งเพื่อยืนยันผลการทดลอง พบว่าปริมาณสารสีแดงที่ได้จากการทดลองยืนยันสภาวะที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 221.20 ± 6.95 OD Units/กรัมน้ำหนักแห้ง และพบว่าปริมาณสารสีแดงที่สภาวะนี้มีค่ามากกว่าผลจากการคำนวณโดยวิธีทากูชิร้อยละ 4.33 (Table 4) ซึ่งถือได้ว่าสามารถนำวิธีทากูชิมาใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดงได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณสารสีแดงที่ผลิตได้มีปริมาณมากกว่าการทดลองของกิติศาสตร์ และคณะ (2551) ที่ศึกษาการผลิตสารสีแดงในระดับห้องปฏิบัติการโดยการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *M. purpureus* TISTR 3080 บนปลายข้าว ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน และมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 30.15 ± 1.05 พบว่า ได้ปริมาณสารสีแดงเท่ากับ 20.9 OD_{500} Units/กรัมน้ำหนักแห้ง อย่างไรก็ตามปริมาณสารสีแดงที่ผลิตได้ในการทดลองนี้ได้ปริมาณที่น้อยกว่าการทดลองของพลายแก้ว และบุษบา (2534) ที่ศึกษาการผลิตสีของเชื้อรา *M. kaoliang* โดยใช้ปลายข้าวหอมมะลิ บ่มเป็นเวลา 12 วัน ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 32.62 พบว่าได้ค่าสีเท่ากับ 317 OD_{500} Units/กรัมน้ำหนักแห้ง

Table 4 Comparison of red pigment yield between predicted optimal value by Taguchi method and actual experiment value.

Parameter	Predicted optimal value by Taguchi method	Actual experiment value
Red pigment yield (OD Units/g dry weight)	212.01	221.20 ± 6.95

สรุป

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีแดงในเครื่องโคจิโดยวิธีทากูชิ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือการเพาะเลี้ยงเชื้อราที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 45 ใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบปริมาณ 3 กิโลกรัม และบ่มที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้งหนึ่งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเพื่อยืนยันผลการทดลอง พบว่าปริมาณสารสีแดงที่ได้จากการทดลองยืนยันสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตสารสีแดงนั้นมีค่ามากกว่าผลจากการคำนวณโดยวิธีทากูชิร้อยละ 4.33 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สามารถผลิตสารสีแดงในเครื่องโคจิโดยใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบได้เป็นอย่างดี ทำให้ได้ผลผลิตในปริมาณมากเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะใช้ในเต้าหู้ยี้แดง

เอกสารอ้างอิง

กังสดาลย์ บุญปราบ. 2538. **การคัดเลือกเชื้อกลายพันธุ์ของเชื้อราโมแนสคัสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตข้าวแดง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กิติศาสตร์ กระบวน, ธีรพร กงบังเกิด, กมลวรรณ โรจน์สุนทรกิตติ, วรสิทธิ์ โทจำปา และ นิติพงศ์ จิตรีโภชน์. 2551. สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตสารต้านออกซิเดชันและสารสีโดย *Monascus purpureus* TISTR

3080 จากปลายข้าว, น. 815-821. *ใน* **การประชุมทางวิชาการนเรศวรวิจัย ครั้งที่ 4 (การบริหารนวัตกรรม)**. พิษณุโลก.

พลายแก้ว ไชยเบญจรงค์ และ บุษบา ยงสมิทธิ์. 2534. ผลของการปรับปรุงวัตถุดิบต่อคุณภาพของอั้งก๊ัก, น. 282-292. *ใน* **การประชุมวิชาการประจำปีของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 29**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วราวุฒิ ครูส่ง และ รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2532. **เทคโนโลยีการหมักในอุตสาหกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1 โอ. เอส.พริ้นติ้ง เฮ้าส์, กรุงเทพฯ.

อรัญ หันพงศ์กิตติกูล, เมธินี เหว่ซึ่งเจริญ และ เรณู ปิ่นทอง. 2531. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตข้าวแดงโดย *Monascus purpureus*. **วารสารเกษตร** 4 (2): 125-128.

A.O.A.C. 1990. **Official Methods of Analysis**. 15th ed. Washinhton, D.C.: Association of official analytical chemists.

Babitha, S., C. Soccol and A. Pandey. 2007. Solid-state fermentation for the production of *Monascus* pigment from jackfruit seed. **Bioresource Technology** 98: 1554-1560.

Dufossé, L., P. Galaup, A. Yaron, S.M. Arad, K.N.C. Murthy and G.A. Ravishankar. 2005. Microorganism and microalgae as source of pigments for use: a scientific oddity or an industrial reality? **Trends in Food Science and Technology** 16: 389-406.

Faber, C.E., A.L. Santerre, M.O. Loret, R. Baberian, A. Paresllerin, G. Goma and P.J. Blanc. 1993. Production and food applications of the red pigments of *Monascus ruber*. **Journal of Food Science** 58: 1099–1110.

Hamano, P. S. and B.V. Kilikian. 2006. Production of red pigments by *Monascus ruber* in culture media containing corn steep liquor. **Braz. J. Chem. Eng.** 23: 443–449.

Heber, D., I. Yip, J.M. Ashley, D.A. Elashoff, R.M. Elashoff and V.L.W. Go. 1999. Cholesterol-lowering effects of a proprietary Chinese red-yeast-rice dietary supplement[1-4]. **Am J Clin Nutr** 69: 231-236.

Laukerics, J.J., A.F. Apsite and V.E. Viesturs. 1984. Solid substrate fermentation of wheat to fungal protein. **Biotechnology and Bioengineering** 26(12): 1465-1474.

Palo, M.A., L. Vidal-Adeva and L. Maceda. 1960. Study on ang-kak and its production. **Philipp. J. Sci. Soc.** 89: 1-22.

Roy, R.K. 2001. **Design of Experiments Using the Taguchi Approach**. John Wiley & Sons, Inc., New York. 538 p.

Yongsmith, B., V. Kitprechavanich, L. Chitradon, C. Chaisrisook and N. Budda. 2000. Color mutants of *Monascus* sp. KB9 and their comparative glucoamylase on rice solid culture. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic** 10: 263- 272.

การยับยั้งการเจริญ *Aspergillus* spp. ที่แยกได้จากข้าวด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์

Growth Inhibitory of *Aspergillus* spp. Isolated from Rice by Chlorine Dioxide Fumigation

วราภา มหากาญจนกุล[1*] พรรณรพี เอี่ยมทวีเจริญ[1] กิตติศักดิ์ อินทร์เสวก[1] ธนภูมิ มณีบุญ[2] และ ชนัญญา ช่วยศรีนวล[2]

Warapa Mahakarnchanakul[1*], Panrapee Iamtaweejaroen[1] Kittisak Insawake[1], Thanapoom Maneeboon[2] and Chananya Chuaysrinule[2]

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนของเชื้อราทำให้ข้าวมีคุณภาพลดลง โดยเฉพาะเชื้อราในกลุ่ม *Aspergillus* ที่สร้างอะฟลาทอกซิน การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบผลของแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราที่สามารถสร้างอะฟลาทอกซิน ได้นำเชื้อราที่แยกจากข้าวกล้องขาวและข้าวกล้องสีจำนวน 56 ไอโซเลต รมแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ที่ 2 และ 4 พีพีเอ็มเป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที วัดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราที่เพาะเชื้อบนอาหาร Potato dextrose agar ที่ 2 และ 4 วัน พบว่าแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 4 พีพีเอ็ม 15 นาทีสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ดี ความเข้มข้นที่ 2 พีพีเอ็ม 15 นาทีให้ผลยับยั้งเชื้อราซึ่งแตกต่างกันขึ้นกับสายพันธุ์ คือสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ตั้งแต่ 0-46% สายพันธุ์ *A. fumigatus, A. tamarii* และ *A. flavus* ต้านทานต่อแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ในขณะที่ *A. brunneoviolaceus* และ *A. fijiensis* ถูกยับยั้งได้ดี จึงควรมีการศึกษาการประยุกต์ใช้แก๊สคลอรีนไดออกไซด์เพื่อช่วยเพิ่มความปลอดภัยในอาหารและยืดอายุการเก็บของอาหารแห้งต่อไป

ABSTRACT

Result from the contamination of fungi, particularly aflatoxin produce *Aspergillus* spp. To determine the growth effect of chlorine dioxide gas on aflatoxin-producing strains, the total of 56 isolates of *Aspergillus* spp. from brown rice and color rice were fumigated. Five species of *Aspergillus* were subjected to chlorine dioxide at 2 and 4 ppm, for 5, 10 and 15 minutes. Then the diameter of colonies was measured on Potatoes Dextrose Agar incubated for 2 and 4 days. High concentration at 4 ppm for 15 minutes had great inhibitory effect. At lower concentration of 2 ppm 15 minutes could inhibit the fungal growth from 0-46 %, on the fungi species. *A. fumigatus*, *A. tamarii* and *A. flavus* were shown to be resistant to chlorine dioxide gas, but *A. brunneoviolaceus* and *A. fijiensis* were more susceptible. The application of chlorine dioxide gas on dried agricultural commodities should be further studied to enhance food safety and extend the shelf life of products, particularly dried food

Key Words: Chlorine dioxide gaseous, fumigation, aflatoxin, *Aspergillus* spp., food safety

* Corresponding author; e-mail address: **fagiwpm@ku.ac.th**

[1] ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

[1] Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok

[2] ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

[2] Scientific Equipment and Research Division, Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Bangkok

คำนำ

การรมแก๊ส (fumigation) เป็นการจัดการกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดศัตรูพืชในผลผลิตการเกษตร ปัจจุบันได้มีการนำแก๊สหลายชนิดเช่น เมททิลโบรไมด์ และ เอททิลฟอร์เมท มาใช้เพื่อทำลายแมลงและไข่แมลง (Reuss *et al.,* 2001) การรมแก๊สช่วยเก็บรักษาผลผลิตให้คงคุณภาพอยู่ได้เป็นเวลานาน โดยไม่เพิ่มความชื้นให้กับเมล็ดพืช (วัชรพลและคณะ, 2553) มีรายงานว่าการรมอาหารแห้งด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียเช่นในพริกไทยได้ผลเป็นที่น่าพอใจ (Han *et al*.,1999)

เชื้อราเป็นตัวการสำคัญทำให้อาหารแห้ง เช่น กลุ่มธัญพืชเน่าเสีย เชื้อรากลุ่ม *Aspergillus* spp. พบทั่วไปในระหว่างการเก็บ (storage fungi) ไม่เพียงแต่ *A. flavus* และ *A. parasiticus* ที่สามารถสร้างอะฟลาทอกซิน สายพันธุ์อื่นเช่น *A. tamarii, A. brunneoviolaceus, A. fijiensis* และ *A. nomius* พบว่าสามารถสร้างอะฟลาทอกซินได้เช่นกัน สารพิษนี้ทราบกันดีว่ามีพิษต่อคนและสัตว์ เป็นสารก่อมะเร็งโดยเฉพาะมะเร็งตับ มักพบปนเปื้อนใน ถั่วลิสง ข้าวโพด ข้าว ข้าวฟ่าง เครื่องเทศ ผลิตภัณฑ์ผักแปรรูป รวมทั้งอาหารสัตว์ การปนเปื้อนของเชื้อราและโอกาสสร้างสารพิษสามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ขั้นตอนการเพาะปลูก การเก็บเกี่ยว และการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นการจัดการปัญหาการปนเปื้อนของสารอะฟลาทอกซินในผลิตผลการเกษตรจึงมีความสำคัญโดยเฉพาะกลุ่มของธัญพืช เช่น ข้าว ซึ่งเป็นอาหารหลักของประเทศไทยและเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญ

คลอรีนไดออกไซด์ เป็นสารในกลุ่มออกซิไดส์ซิ่งเอเจนต์ที่นิยมใช้กำจัดเชื้อโรคอย่างกว้างขวางในยุโรปและอเมริกา คลอรีนไดออกไซด์มีคุณสมบัติในการออกฤทธิ์ได้กว้าง ครอบคลุมการทำลายจุลินทรีย์หลายชนิด (Broad Spectrum) ทั้งแบคทีเรีย เชื้อรา และ สาหร่าย (Agency for Toxic Substances and Disease Registry ATSDR, 2004) การใช้คลอรีนไดออกไซด์ในรูปแก๊สมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อที่ดีกว่ารูปสารละลายเนื่องจากแก๊สสามารถซึมผ่านวัสดุและอาหารได้ดีกว่า การรมแก๊สจึงต้องเลือกให้เหมาะสมต่อการใช้งาน (Vandekinderen *et al*., 2009) ในรูปสารละลายคลอรีนไดออกไซด์ในน้ำ (aqueous chlorine dioxide) พบว่ามีผลดีในการฆ่าเชื้อ (Jang *et al*., 2006) ปัจจุบันมีการใช้อย่างกว้างขวางในการลดจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหารในผลไม้และผัก (Singh *et al*., 2002 ; Wu and Kim, 2007) และอาหารทะเล (Kim *et al*., 1999; Andrews *et al*., 2002) ในการเก็บรักษาอาหารแห้งจึงควรประยุกต์ใช้คลอรีนไดออกไซด์ในรูปแก๊สเพื่อยืดอายุการเก็บและเพิ่มความปลอดภัยของอาหาร งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ในการยับยั้งเชื้อรา เพื่อให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นในระดับห้องปฏิบัติการ สนับสนุนความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้แก๊สในอาหารแห้ง เช่น ข้าว ทั้งนี้ได้ใช้ไอโซเลตเชื้อราที่แยกได้จากข้าวกล้องขาวและข้าวกล้องสีและสามารถสร้างอะฟลาทอกซินได้เป็นตัวแทนในการศึกษา

อุปกรณ์และวิธีการ

เชื้อราและการเตรียมสารแขวนลอยสปอร์เชื้อรา

เชื้อรา *Aspergillus* spp. ทั้งหมด 56 ไอโซเลตได้รับความอนุเคราะห์จากฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แยกได้จากข้าวกล้องชนิดข้าวกล้องขาวและข้าวกล้องสี จำแนกสายพันธุ์โดยวิธีการหาลำดับเบสดีเอ็นเอ (DNA Sequencing) โดยใช้ยีนบริเวณ Calmodulin gene (Hong *et al*., 2006) จำแนกได้ 5 สายพันธุ์ ได้แก่ *A. flavus* 44 ไอโซเลต, *A. tamari* 3 ไอโซเลต, *A. fijiensis* 4 ไอโซเลต, *A. fumigatus* 2 ไอโซเลต และ *A. brunneoviolaceus* 3 ไอโซเลต นำมาเพาะเลี้ยง

บนอาหาร Potatoes Dextrose Agar (PDA, Criterion, USA) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ทำการเขี่ยสปอร์ลงในสารละลาย tween20 (Labchem, Australia) ความเข้มข้น ร้อยละ 0.1 ในน้ำกลั่นปลอดเชื้อปริมาตร 1 มิลลิลิตร เก็บที่อุณหภูมิ 2-4 องศาเซลเซียส สำหรับใช้ในการทดลองต่อไป

ในการทดลองทดสอบผลของการรมด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ในการยับยั้งเชื้อรา ให้หยดสารแขวนลอยสปอร์เชื้อราปริมาณ 10 ไมโครลิตร เขี่ยเชื้อไอโซเลตแบบจุด (spot inoculation) ลงบนอาหาร PDA บนจานเพาะเชื้อ จานละ 1 หยด จำนวน 4 จาน ทิ้งไว้ให้แห้ง 5 นาที จึงนำมารมด้วยแก๊ส

การออกแบบกล่องและรมเชื้อราด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์

อ้างอิงจากวิธีการของ Sant'Annal *et al*. (2012) แก๊สคลอรีนไดออกไซด์ในที่นี้เตรียมจากสารละลายคลอรีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 50 และ 100 พีพีเอ็ม เมื่อสารละลายเปลี่ยนเป็นแก๊สคลอรีนได้ออกไซด์จะได้ความเข้มข้นต่อปริมาตรของกล่องที่ระดับ 2 และ 4 พีพีเอ็ม ตามลำดับ เตรียมแก๊สโดยนำสารละลายคลอรีนไดออกไซด์ความเข้มข้นบรรจุในขวดรูปชมพู่แล้วต่อท่อจากขวดเข้าสู่กล่องอะคริลิคขนาด 38x60x45 เซนติเมตร (กว้างxยาวxสูง) ส่วนด้านหลังของกล่องติดพัดลมกระจายแก๊ส วางจานเพาะเชื้อที่หยดสารละลายเชื้อราแล้วบนตะแกรงอลูมิเนียมสูง 20 เซนติเมตรจากก้นกล่อง เมื่อให้ความร้อนสารละลายคลอรีนไดออกไซด์เข้มข้นปริมาตร 400 มิลลิลิตรด้วย Hot plate ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 15 นาที สารละลายจะกลายเป็นแก๊สระเหยเข้าสู่กล่อง ระบบปิดนี้ดัดแปลงมาจาก Vandekinderen และคณะ (2009) (Figure 1)

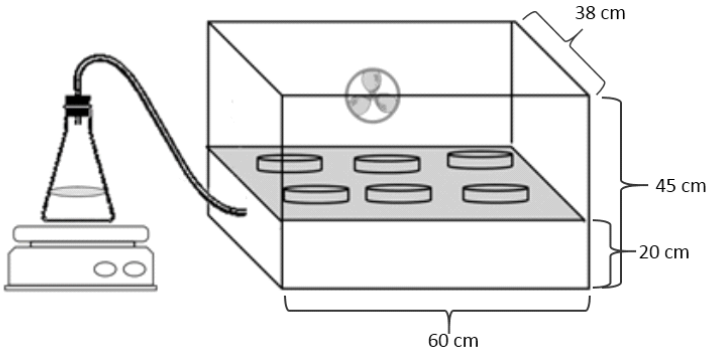


Figure 1 Diagram of the chlorine dioxide gas system for *Aspergillus* spp. fumigation

การวัดปริมาณคลอรีนไดออกไซด์

แก๊สคลอรีนไดออกไซด์จะถูกดักจับด้วยสารละลาย 1 นอร์มัล โพแทสเซียมไอโอไดด์ก่อนนำไปวัดความเข้มข้น สามารถวัดปริมาณคลอรีนไดออกไซด์ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ Gómez-López *et al*. (2007) ด้วยวิธี Iodometric method คำนวณได้จาก 0.169 x (B - A) เท่ากับปริมาณคลอรีนไดออกไซด์ กรัม/ลิตร

เมื่อ A เป็นปริมาณของ 0.1 นอร์มัล สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต

B เป็นปริมาณของ 0.1 นอร์มัล สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต หลังเติม 4 นอร์มัล กรดซัลฟิวริก

การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาความเข้มข้น และเวลาที่เหมาะสมในการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา

นำอาหาร PDA ที่หยดสารแขวนลอยสปอร์ของเชื้อรา *Aspergillus* spp. 5 สายพันธุ์ รมด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 และ 4 พีพีเอ็ม โดยจะเริ่มนับเวลาเมื่อแก๊สเข้าสู่กล่อง ที่เวลา 5 10 และ 15 นาที เพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตรวจสอบการเจริญของเชื้อราโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี ใน

วันที่ 2 และ 4 เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม คือเชื้อราที่ไม่ผ่านการรมแก๊สและเพาะเชื้อในสภาวะเดียวกัน คำนวณหา % growth inhibition จากสมการ

$$\% \text{ growth inhibition} = \frac{(\text{เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของตัวอย่างควบคุม (ซม.)} - \text{เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีที่วันต่างๆ (ซม.)}) \times 100}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของตัวอย่างควบคุม (ซม.)}}$$

การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา ทั้ง 56 ไอโซเลต

นำอาหาร PDA ที่หยดสารแขวนลอยสปอร์เชื้อราทั้งหมด 56 ไอโซเลต นำมารมด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที ตรวจสอบผลการยับยั้งการเจริญด้วยวิธีเดียวกับหัวข้อก่อนหน้า ทำ 4 ซ้ำต่อไอโซเลต แสดงผลในรูปค่าเฉลี่ย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดสอบเบื้องต้นของประสิทธิภาพของแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ในการยับยั้งเชื้อรา 5 สายพันธุ์

ได้เลือกเชื้อรา *Aspergillus* spp. 5 สายพันธุ์นำมารมด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ พบว่าร้อยละของการยับยั้งการเจริญของเชื้อราเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สคลอรีนไดออกไซด์และระยะเวลาการรมเพิ่มขึ้น การรมแก๊สที่ 4 พีพีเอ็มเป็นเวลา 15 นาทีไม่พบการเจริญของเชื้อรา *Aspergillus* spp. ทั้ง 5 สายพันธุ์ สามารถยับยั้งการเจริญได้หมด แต่ที่ 2 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที ให้ผลการยับยั้งการเจริญของเชื้อราแตกต่างกันขึ้นกับสายพันธุ์ ทั้งนี้สามารถจำแนกเชื้อราดังกล่าวได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ยับยั้งได้น้อยหรือต้านทานต่อแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ ได้แก่ สายพันธุ์ *A. fumigatus, A. tamarii* และ *A. flavus* และกลุ่มที่ยับยั้งคือไม่ต้านทานต่อแก๊สคลอรีนไดออกไซด์คือสายพันธุ์ *A. brunneoviolaceus* และ *A. fijiensis* การยับยั้งเชื้อราที่เจริญเป็นระยะเวลา 2 และ 6 วัน พบว่าเมื่อเพาะเชื้อเป็นเวลานานขึ้น เชื้อราในกลุ่มที่ต้านทานต่อแก๊สคลอรีนไดออกไซด์มีอัตราการเจริญเพิ่มขึ้น หรือร้อยละของยับยั้งลดลง (Figure 2A และ 2B) สังเกตได้ในเชื้อราสายพันธุ์ *A. fumigatus, A. tamari* และ *A. flavus* โดยระยะเวลาในการรมและความเข้มข้นไม่ส่งผลต่อการยับยั้งอย่างมีนัยสำคัญต่อเชื้อ *A. flavus* ($p>0.05$) แต่จะมีผลต่อเชื้ออีก 4 สายพันธุ์ ($p\leq0.05$)

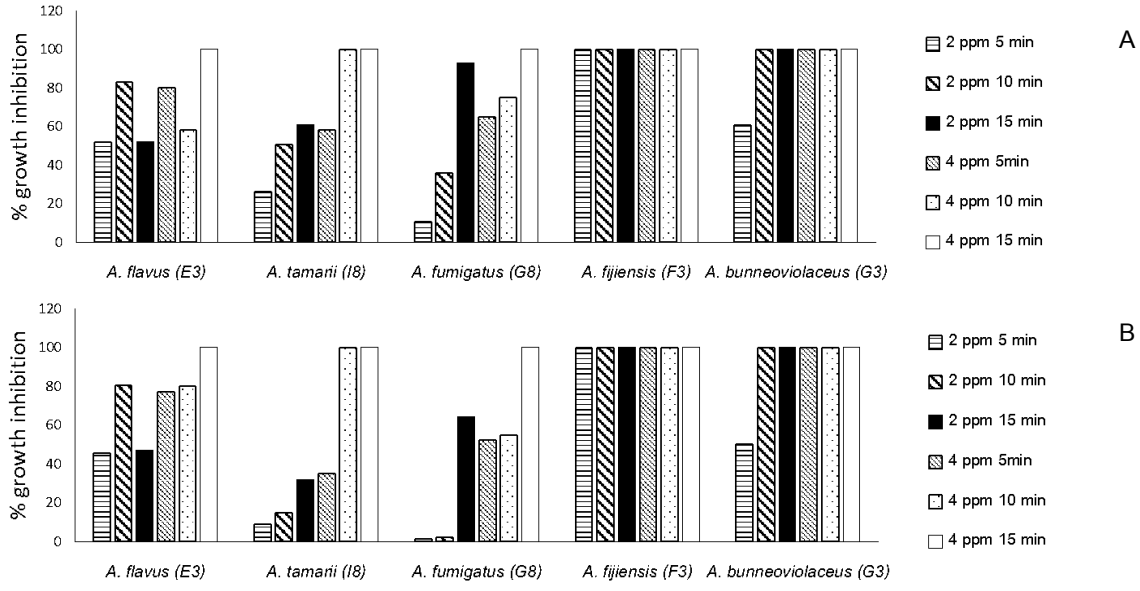


Figure 2 Percentage inhibition of 5 species of *Aspergillus* fumigated by chlorine dioxide at 2 and 4 ppm, for 5, 10 and 15 minutes and incubated on PDA for 2 days (A) and 6 days (B)

การยับยั้งเชื้อรา 56 ไอโซเลตด้วยการรมแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ 2 พีพีเอ็ม

ได้เลือกความเข้มข้นแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ที่ 2 พีพีเอ็ม เพื่อหาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในการรมแก๊สผลิตผลเกษตร เนื่องจากที่ความเข้มข้นของแก๊สต่ำจะช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่นและค่าใช้จ่ายในการเตรียมแก๊ส รวมทั้งเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้ที่ปฏิบัติงาน ผลการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา *A. flavus* ที่แยกได้จากข้าวกล้องขาว 26 ไอโซเลต และข้าวกล้องสี 18 ไอโซเลต รมด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์เข้มข้น 2 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที และเพาะเชื้อเป็นระยะเวลา 4 วัน ที่ 15 นาทีมีการยับยั้งการเจริญในช่วง 0-46% มี 4 ไอโซเลตที่ไม่สามารถยับยั้งได้ที่ความเข้มข้นนี้ และที่เวลา 10 และ 15 นาทีร้อยละของการยับยั้งให้ผลใกล้เคียงกัน (Figure 3A และ 3B) ถึงแม้ว่าเป็นเชื้อราสายพันธุ์ *A. flavus* แต่แสดงความสามารถในการต้านทานแก๊สคลอรีนไดออกไซด์แตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละไอโซเลตที่แยกมาจากข้าวกล้องมาจากแหล่งและสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน เช่นเดียวกับเชื้อราอีก 4 สายพันธุ์มีการตอบสนองที่แตกต่างกันในแต่ละไอโซเลต (Figure 3C)

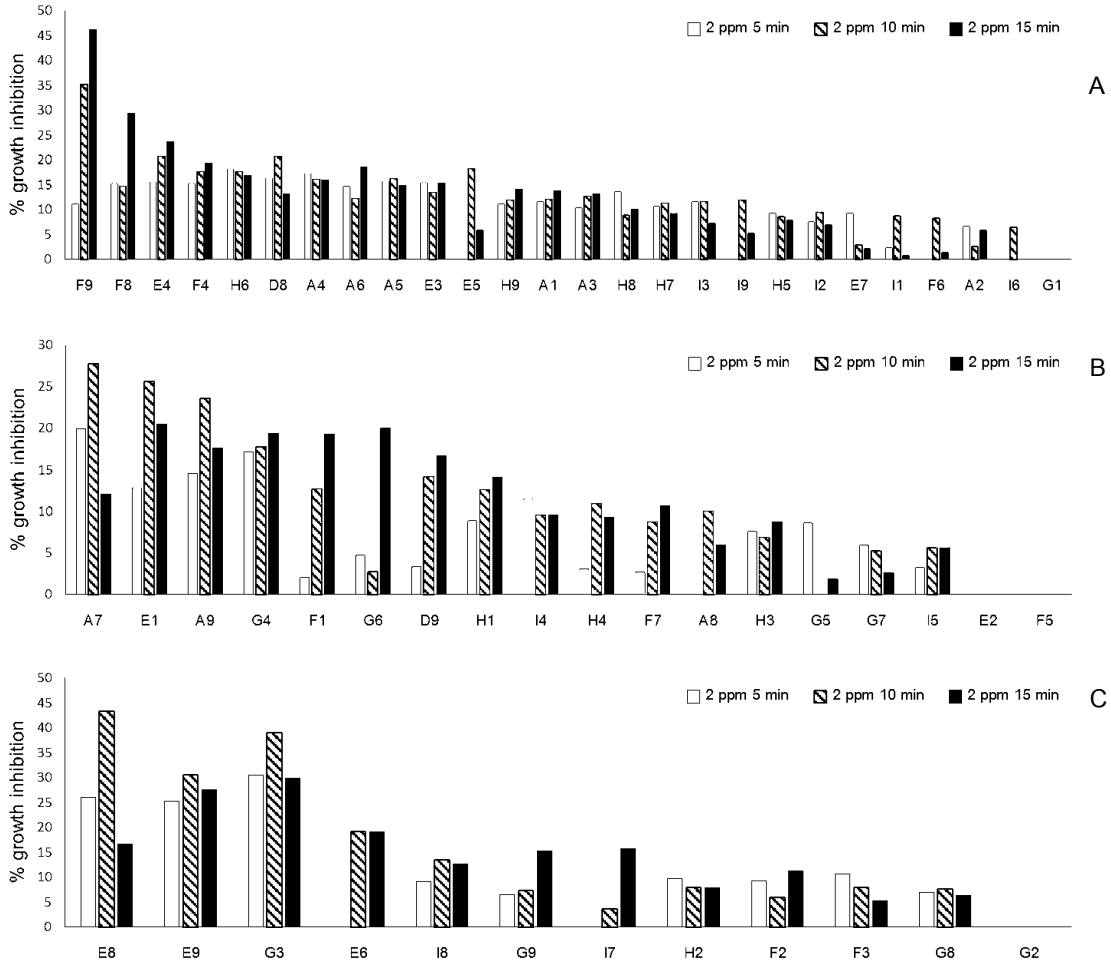


Figure 3 Percentage inhibition of *Aspergillus* spp 56 isolates fumigated by chlorine dioxide at condition of 2 ppm, for 5, 10 and 15 minutes, incubated on PDA for 4 days *A. flavus* isolate from brown rice:F9, F8, E4, F4, H6, D8, A4, A6, A5, E3, E5, H9, A1, A3, H8, H7, I3, I9, H5, I2, E7, I1, F6, A2,I6 and G1 (A), *A. flavus* isolate from color rice: A7, E1, A9, G4, F1, G6, D9, H1, I4, H4, F7, A8, H3, G5, G7, I5, E2 and F5 (B),and other species : *A. fijiensis*: E8, E9,F3,G2 *A. bunneoviolaceus*: G3, E6,G2 *A. tamarii*:I8,I7,H2 , *A. fumigatus*:F2, G8 (C)

วิจารณ์

การตอบสนองต่อแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ในเชื้อราแต่ละสายพันธุ์ที่ระดับความเข้มข้นที่ 2 พีพีเอ็ม เวลา 15 นาที พบว่าการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา *A. brunneoviolaceus* เป็น 15-30% และ *A. fijiensis* เป็น 0-28% ส่วนในกลุ่มของ *A. tamarii* และ *A. fumigatus* จะยับยั้งการเจริญได้เพียง 8-16% และ 6-11% ตามลำดับ โดยเชื้อรา *A. flavus* มีการยับยั้งการเจริญมีตั้งแต่ไม่สามารถยับยั้งได้ จนถึงยับยั้งได้ 46% ซึ่งแต่ละไอโซเลตมีการตอบสนองต่อแก๊สได้แตกต่างกัน โดยการยับยั้งส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 10-20% สอดคล้องกับรายงานของ Abbaszadeh *et al.* (2014) ได้ทดสอบประสิทธิภาพของสารที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา ในกลุ่มของ ไทมอล คาร์วาครอล ยูจีนอล และ เมนทอล กับเชื้อราที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียของอาหาร 11 สายพันธุ์ ได้แก่ *Aspergillus niger, A. fumigatus, A. flavus, A. ochraceus, Alternaria alternate, Botrytis cinerea, Cladosporium* spp., *Penicillium citrinum, P. chrysogenum, Fusarium oxysporum* และ *Rhizopus oryzae* พบว่าเชื้อรามีความไวต่อการตอบสนองของสารยับยั้งเหล่านี้ในแต่ละสายพันธุ์แตกต่างกัน โดยกลไกการทำงานของแก๊สคลอรีนไดออกไซด์คือยับยั้งจุลินทรีย์จากการที่แก๊สซึมเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์กับหมู่ไทออลบนเอนไซม์ได้เป็นไดซัลไฟด์ จึงทำให้จุลินทรีย์เสียสภาพ (Huang *et al*., 1997) ในกรณีเชื้อราสายพันธุ์อื่น ได้แก่ *Stachybotrys chartarum, Chaetomium globosum* และ *Penicillium chrysogenum* ซึ่งพบว่าเป็นเชื้อราที่พบในอาคารบ้านเรือนที่ชื้น ก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพกับมนุษย์ พบว่าต้องใช้ระดับแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงถึง 500 และ 1,000 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงจะสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราดังกล่าว (Wilson *et al*.,2005) ทั้งนี้สปอร์ของเชื้อรามีความสามารถในการต้านทานต่อแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ได้ดี เพราะสปอร์ประกอบด้วยเยื่อหุ้มหลายชั้นห่อหุ้มสปอร์ไว้ภายใน เยื่อหุ้มหลายชั้นดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันแสงอัลตร้าไวโอเลต และภาวะแห้งได้ (Millner *et al*., 1977) คาดว่าเยื่อหุ้มสปอร์ของเชื้อราสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ได้ (Wilson *et al*., 2005)

ในกรณีแบคทีเรียสร้างสปอร์ เช่น *Bacillus cereus* มีรายงานว่าสามารถต้านแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ได้ดีรองลงมาคือรา ยีสต์ แบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ ตามลำดับ (Vaid *et al*., 2010) ในวัตถุดิบอาหารที่มีการเติมเชื้อแลคติคแบคทีเรียคือ *Leuconostoc mesenteroids* พบว่าการเติมปริมาณ 4 log cfu/g ผสมสารละลายสตาร์ช กับ น้ำมันข้าวโพด เนย เวย์โปรตีน และเกลือในอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นรมด้วยแก๊สคลอรีนไดออกไซด์เข้มข้น 0.08 พีพีเอ็มเป็นเวลา 1 นาที ที่ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 90 พบว่าองค์ประกอบอาหารที่แตกต่างกันมีผลต่อประสิทธิภาพของแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ได้แตกต่างกัน (Han *et al*., 1999) ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของแก๊สคลอรีนไดออกไซด์นอกเหนือจากความเข้มข้น ระยะเวลาของการสัมผัส ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ (Han *et al*., 2001) ต้องคำนึงถึงการมีสปอร์ของจุลินทรีย์ สารประกอบเช่นอาหารที่เกี่ยวข้อง และขึ้นกับชนิดและสายพันธุ์จุลินทรีย์ ในงานทดลองนี้พบว่าระดับความเข้มข้นและระยะเวลาในการรมเท่ากันจะให้ประสิทธิภาพของการยับยั้งการเจริญของเชื้อราในแต่ละสายพันธุ์แตกต่างกัน หรือแม้แต่ในสายพันธุ์เดียวกัน แต่แยกมาจากข้าวแหล่งแตกต่างกันก็แสดงความสามารถในการทนทานต่อแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ต่างกัน อย่างไรก็ตามในการวิจัยครั้งนี้พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 4 พีพีเอ็ม นาน 15 นาที สามารถยับยั้งเชื้อรา *Aspergillus* spp.ทั้ง 5 สายพันธุ์ (E3, I8, G8, F3 และ G3) แต่ยังมีข้อจำกัดจึงควรมีการศึกษาในการประยุกต์ใช้ในอาหารเช่นเมล็ดพืช ข้าว และถั่ว ว่าสามารถใช้ในทางปฏิบัติจริงได้จริงต่อไป

สรุป

งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลเบื้องต้นที่มีประโยชน์ต่อการนำไปพัฒนาการประยุกต์ใช้แก๊สคลอรีนไดออกไซด์เพื่อยับยั้งการเจริญของกลุ่มเชื้อรา *Aspergillus* ที่สร้างสารพิษคืออะฟลาทอกซิน ในที่นี้พบว่าแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 พีพีเอ็ม 15 นาทีสามารถยับยั้ง เชื้อรา *Aspergillus* spp. ที่แยกได้จากข้าวกล้องและข้าวกล้องสี 5 สายพันธุ์ได้ แต่พบว่าเชื้อรามีความต้านทานคือการยับยั้งในช่วงต่ำกว่า 50 % อาจเนื่องจากเชื้อราเหล่านี้เป็นเชื้อราธรรมชาติ ในเชื้อราสายพันธุ์เดียวกันยังแสดงความต้านทานต่อแก๊สคลอรีนไดออกไซด์แตกต่างกันเป็นไปได้ว่าเนื่องจากอิทธิพลจากแหล่งที่มาของแต่ละไอโซเลตแตกต่าง การศึกษาต่อไปควรได้มีการทดสอบการรมแก๊สคลอรีนไดออกไซด์ในธัญพืชที่สร้างการปนเปื้อนเชื้อรา ได้แก่ ถั่วลิสง ข้าวโพด เครื่องเทศ และผลิตภัณฑ์อาหารแห้งอื่น ดูการเปลี่ยนแปลงของอาหาร เพื่อนำมาประยุกต์ใช้จริงในทางอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนและนักวิจัยจากศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหาร สถาบันวิทยาการขั้นสูงแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขอขอบคุณ น.ส.จุฬาลักษณ์ พวงมะลิ, น.ส.ศุทธินี ตั้งสกุล และ น.ส. อินทุภา สุระคำแหง นิสิตปีที่ 4 ในโครงการวิจัยวิชาเทคนิควิจัยปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

เอกสารอ้างอิง

วัชรพล ชัยประเสริฐ เอนก สุขเจริญ และ กิตติเดช โพธิ์นิยม. 2553. **การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรมยาด้วยสารฟอสฟีนในข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในไซโลกับข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในกระสอบป่าน**.โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 31น.

Abbaszadeh, S., A. Sharifzadeh, H. Shokri, A.R. Khosravi and A. Abbaszadeh. 2014. Antifungal efficacy of thymol, carvacrol, eugenol and menthol as alternative agents to control the growth of food-relevant fungi. **Journal of Medical Mycology** 24:e51-e56.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2004. **Chlorine dioxide and chlorite.** Available source: http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts160.

Andrews, L.S., A.M. Key, R.L. Martin, R. Grodner and D.L. Park., 2002. Chlorine dioxide wash of shrimp and crawfish an alternative to aqueous chlorine. **Food Microbiology** 19: 261–267.

ATSDR. 2004. **Toxicological Profile for Chlorine Dioxide and Chlorite**. U.S. Department of Health & Human Services, Atlanta, Georgia, USA.

Han, Y., A.M. Guentert, R.S. Smith, R.H. Linton and P. E. Nelson. 1999. Efficacy of chlorine dioxide gas as a sanitizer for tanks used for aseptic juice storage. **Food Microbiology** 16: 53-61.

Han, Y., J.D. Floros, R.H. Linton, S.S. Nielsen and P.E. 2001. Reduction of *Listeria monocytogenes* on green peppers (*Capsicum annuum* L.) by gaseous and aqueous chlorine dioxide and water washing and its growth at 7 °C. **Food Protection** 64: 1730–1738.

Hong, S.B., H.S. Cho, H.D. Shin, J.C. Frisvad and R.A. Samson. 2006. Novel *Neosartorya* species isolated from soil in Korea. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology** 56:477-486

Huang, J., L. Wang, L. Ren, N.Q. Ma and F. Juli.1997. Disinfection effect of chlorine dioxide on bacteria in water. **Water Research** 31: 607–613.

Gómez-López, V.M., F. Devlieghere, P. Ragaert and J. Debevere. 2007. Shelf-life extension of minimally processed carrots by gaseous chlorine dioxide. **International Journal of Food Microbiology** 16: 221–227.

Jang, A., J. Szabo, A.A. Hosni, M. Coughlin and P.L. Bishop. 2006. Measurement of chlorine dioxide penentration in dairy process pipe biofilms during disinfection. **Applied Microbial and Cell Physiology** 72: 368–376.

Kim, J.M., T.S. Huang, M.R. Marshall and C.I. Wei. 1999. Chlorine dioxide treatment of sea foods to reduce bacterial loads. **Journal of Food Science** 64: 1089–1093.

Millner, P.D., J.J. Motta and P.L. Lentz. 1977. Ascospores, germ pores, ultrastucture, and thermophilism of *Chaetomium*. **Mycologia** 69: 720-733.

Reuss, R.E.,P. Annis and Y. Khatri. 2001. Fumigation of paddy rice and rice products with ethyl formate. pp. 741-749.pp. *In* **Proceeding International Conference Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, Fresno, CA. 29 Oct. - 3 Nov. 2000,** Clovis, U.S.A

Sant'Annal R.T.P., C.M.P. Santos, G.P. Silva, R.J.R. Ferreira, A.P. Oliveira, C.E.S. Côrtes and R.B. Faria. 2012. Kinetics and mechanism of chlorate-chloride reaction. **Journal of the Brazilian Chemical Society** 23(8):1543-1550.

Singh, N., R.K. Singh, A.K. Bhunia and R.I. Stroshine. 2002. Effect of inoculation and washing methods on the efficacy of different sanitizers against Escherichia coli O157:H7 on lettuce. **Food Microbiology** 19(2-3):183-193.

Vaid, R. ,R.H. Linton and M.T. Morgan. 2010. Comparison of inactivation of *Listeria monocytogenes* within a biofilm matrix using chlorine dioxide gas, aqueous chlorine dioxide and sodium hypochlorite treatments. **Food Microbiology** 8:979-84.

Vandekinderen, I., F. Devlieghere, J. Van Camp, B. Kerkaert, T. Cucu. P. Ragaert, J. De Bruyne and B. De Meulenaer. 2009. Effect of food composition on the inactivation of foodborne microorganisms by chlorine dioxide. **International Journal of Food Microbiology** 31:138-144.

Wilson, S. C., C. Wu, L. A. Andriychuk, J. M. Martin, T. L. Brasel, C. A. Jumper and D. C. Straus. 2005. Effect of chlorine dioxide gas on fungi and mycotoxins associated with sick building syndrome applied and environment. **Microbiology** 71:5399–5403

Wu, V.C.H. and B. Kim. 2007. Effect of a simple chlorine dioxide method for controlling five foodborne pathogens, yeasts and molds on blueberries. **Food Microbiology** 24:794–800.

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์กระดาษต้านเชื้อราเคลือบน้ำมันหอมระเหยจากใบยูคาลิปตัสและเสม็ดขาวเพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะม่วง

Development of antifungal paper packaging coated with eucalyptus and cajuput oil for extending shelf-life of mango

ชัยพร สามพุ่มพวง[1*] อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ[1] ประภัสสร รักถาวร[1] และ สุธีรา วิทยากาญจน์[1]

Chaiyaporn Sampoompaung[1*], Udomlak Sukatta[1], Prapassorn Rugthaworn[1] and Suteera Witayakran[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประยุกต์ใช้น้ำมันหอมระเหยจากยูคาลิปตัสและเสม็ดขาวในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีคุณสมบัติต้านเชื้อราและสามารถยืดอายุการเก็บรักษามะม่วง โดยน้ำมันหอมระเหยที่ใช้ในการศึกษานี้คือ น้ำมันสูตรผสมระหว่าง น้ำมันอบเชย ต่อ น้ำมันยูคาลิปตัสผสมน้ำมันเสม็ดขาว(1:1) ที่อัตราส่วน 7 : 3 บรรจุภัณฑ์สำหรับมะม่วงในงานวิจัยนี้จะอยู่ในรูปของถุงกระดาษ โดยถุงกระดาษถูกเคลือบด้วยสารละลายอิมัลชันของไขผึ้งที่เติมน้ำมันสูตรผสมในปริมาณต่างกัน 6 ระดับ คือร้อยละ 0 2 4 6 8 และ 10 จากผลการทดลองพบว่าถุงกระดาษบรรจุมะม่วงที่เคลือบด้วยสารเคลือบสามารถควบคุมการเน่าเสียของผลมะม่วงได้ดีกว่าที่บรรจุในถุงที่ไม่ได้เคลือบ โดยสูตรสารเคลือบที่เติมน้ำมันหอมระเหยสูตรผสมที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 ก็เพียงพอที่จะยับยั้งการเกิดโรคจากเชื้อ *C. gloeosporioides* ในผลมะม่วงได้

ABSTRACT

This research studied the application of essential oils from eucalyptus and cajuput tree in the development of active packaging with antifungal activity that can extend shelf-life of mango. The essential oil formulation used in this study was the mixture of cinnamon oil and the mixture of eucalyptus and cajuput oil (1:1) at the ratio of 7 : 3.Mango packaging in this study was in the form of paper bag. The paper bag was coated with beeswax emulsion containing the essential oil at 6 different concentrations: 0, 2, 4, 6, 8, and 10%. The results showed that the coated paper bags could restrain the spoilage of mango better than the uncoated paper bag. The beeswax emulsion containing the essential oil at 8% was sufficient to inhibit the growth of *C. gloeosporioides* in mango.

Key Words: Eucalyptus, Cajuput tree, Essential oil, Active packaging, Paper

*Corresponding author; e-mail address: **aapcps@ku.ac.th**

[1]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ยูคาลิปตัสและเสม็ดขาวเป็นพืชที่ผลิตได้ในประเทศไทยและมีปริมาณผลผลิตสูง น้ำมันหอมระเหยและสารสกัดที่ได้จากพืชเหล่านี้มีการนำใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การใช้น้ำมันยูคาลิปตัส และเสม็ดขาวในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง การใช้ในเภสัชอุตสาหกรรมและการใช้ในสุคนธบำบัด นอกจากนี้น้ำมันหอมระเหยและสารสกัดที่ได้จากยูคาลิปตัสและเสม็ดขาวนั้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น น้ำมันหอมระเหยจากยูคาลิปตัสสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เชื้อราที่ก่อโรคหลังการเก็บเกี่ยวและเชื้อราในดิน ยับยั้งการเจริญของเส้นใยของเชื้อรา และยับยั้งการงอกของสปอร์เชื้อราได้ นอกจากนี้น้ำมันเสม็ดขาวมีคุณสมบัติในการต้านเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น *Proteus vugaris, Pseudomonas aeruginosa, Escherichia coli, Staphylococcus aureus, S. capitis, S. epidermis, Enterococcus faecium, Bacillus subtilis, Corynebacterium diptheriae* และ *C. minutissium* นอกจากนี้ยังยับยั้งการเจริญของเชื้อรา *Penicillium notatum, Aspergillus niger* เชื้อราที่ก่อโรคผิวหนังบางชนิดเช่น *Epidermophyton floccosum, Trichophyton rubrum* รวมทั้งเชื้อยีสต์ *Candida albican* (Christop *et al*., 2000) เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นว่าน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากพืชเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้หลากหลายชนิด ซึ่งในปัจจุบันความสนใจในการนำน้ำมันหอมระเหยและสารสกัดจากธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ในด้านบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging) มีเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพื่อทำให้บรรจุภัณฑ์มีคุณสมบัติต้านเชื้อจุลินทรีย์และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตและอาหาร กระดาษก็ถือเป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อตอบสนองจุดประสงค์ของการใช้งานแต่ละประเภท โพลิเมอร์จากธรรมชาติ (biopolymer) เช่น สารโพลิแซคคาไรด์ โปรตีน หรือ ไขมัน สามารถนำมาใช้ในการเคลือบบรรจุภัณฑ์กระดาษได้ ตัวอย่างเช่นไขมัน ซึ่งได้แก่กรดไขมันสายยาว (long chain fatty acid) และ ไข (waxes) สามารถนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มหรือใช้เป็นสารเคลือบได้เนื่องจากคุณสมบัติการไล่น้ำของไขมัน ไข (waxes) เป็นสารจำพวกไขมันที่มีประสิทธิภาพในการลดการแพร่ผ่านของไอน้ำได้ดี ดังนั้นจึงถูกใช้อย่างกว้างขวางในการเคลือบกระดาษหรือกล่องกระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการกันน้ำของบรรจุภัณฑ์และยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร นอกจากนี้การเคลือบกระดาษด้วยโพลิเมอร์จากธรรมชาติยังเป็นวิธีที่มีศักยภาพวิธีหนึ่งในการเตรียมบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต้านเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและยังสามารถใช้วิธีการนี้ได้กับทั้งสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นสารระเหยและสารไม่ระเหย (Khwaldia et al., 2010) สารที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้ได้แก่ กรดอินทรีย์ (เช่น sorbic acid, propionic acid และ benzoic acid), acid anhydrides, nisin, pediocin, lactin, เอนไซม์ (เช่น lyzozyme, lactoperoxidase, chitinase และ glucoseoxidase) และ น้ำมันหอมระเหย (essential oils) เป็นต้น ซึ่งเมื่อไม่นานนี้ Rodriguez et al. (2007, 2008) ได้รายงานการเตรียมบรรจุภัณฑ์กระดาษแอคทีฟที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่มีผลทำให้อาหารเน่าเสียหลากหลายชนิด โดยการเคลือบกระดาษด้วย paraffin wax ที่มีส่วนผสมของน้ำมันหอมระเหยจากกานพลู อบเชย และ oregano ซึ่งกระดาษแอคทีฟนี้สามารถนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์

แอคทีฟสำหรับบรรจุสตรอเบอรี่ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดีในที่นี้น้ำมันเสม็ดขาวและยูคาลิปตัสซึ่งมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปศึกษาการประยุกต์ใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ จึงถูกนำมาพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติต้านเชื้อราที่สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลมะม่วงได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาการพัฒนากระดาษเคลือบน้ำมันหอมระเหยต้านเชื้อราเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

ศึกษาการพัฒนากระดาษเคลือบน้ำมันหอมระเหยต้านเชื้อราโดยนำสูตรเคลือบกระดาษที่มีบีแวกซ์ (beeswax) ประกอบด้วยบีแวกซ์ร้อยละ 17 กรดสเตียริก (stearic acid) ร้อยละ 7.5 ไตรเอทานอลเอมีนร้อยละ 4.5 และน้ำกลั่นร้อยละ 71 สูตรเคลือบดัดแปลงจากวิธีของ Salman *et al.* (2008) น้ำมันหอมระเหยถูกเติมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน ได้แก่ร้อยละ 0 2 4 6 8 และ 10 ของสารเคลือบ น้ำมันหอมระเหยที่ใช้ในการศึกษา คือ น้ำมันสูตรผสมระหว่าง น้ำมันอบเชย ต่อ น้ำมันยูคาลิปตัสผสมน้ำมันเสม็ดขาว(1:1) ที่อัตราส่วน 7 : 3 โดยมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดของการต้านการเจริญของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* (C), *Aspergillus niger* (A) และ *Lasiodiplodia theobromae* (L) คือ 100 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ใช้วิธีเคลือบกระดาษด้วยแท่งขดลวด (coating rod, No 10) เคลือบกระดาษให้มีความหนาของสารเคลือบเท่ากับ 10 ไมครอน นำไปทดสอบคุณสมบัติของกระดาษตามวิธีมาตรฐาน TAPPI โดยทดสอบตามแนวขนานเครื่องของกระดาษ (machine direction, MD) และตามแนวขวางเครื่องของกระดาษ (cross machine direction, CD)

การทดสอบการต้านเชื้อราของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเคลือบน้ำมันหอมระเหย

นำมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ที่ซื้อมาจากตลาดไทมาคัดเลือกผลมะม่วงที่ผิวมีตำหนิออก จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อที่ผิวด้วยแอลกอฮอล์ร้อยละ 70 โดยจุ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วินาที และจุ่มล้างด้วยน้ำกลั่นทันที 1 ครั้ง แล้วนำไปผึ่งให้แห้ง เพื่อรอการเปิดปากแผลและปลูกเชื้อที่บาดแผลผลมะม่วง ใน 1 ผลจะปลูกเชื้อพร้อมกันทั้ง 3 เชื้อ เชื้อราที่ปลูกมี 3 เชื้อ ได้แก่ *Colletotrichum gloeosporioides* (C), *Aspergillus niger* (A) และ *Lasiodiplodia theobromae* (L) หลังจากปลูกเชื้อแล้วนำผลมะม่วงใส่ถุงกระดาษที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่มีน้ำมันหอมระเหยซึ่งเตรียมได้ข้างต้น นำผลมะม่วงใส่ถุงกระดาษจำนวน 3 ผลต่อถุง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25-28 องศาเซลเซียส วัดผลเปรียบเทียบการต้านเชื้อของสารเคลือบกระดาษสูตรที่มีน้ำมันหอมระเหยความเข้มข้นต่างกันโดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยแผลที่เกิดจากเชื้อที่ระยะเวลาการเก็บ 3 5 และ 7 วัน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาการพัฒนากระดาษเคลือบน้ำมันหอมระเหยต้านเชื้อราเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

จากการศึกษาการเคลือบกระดาษห่อวัสดุด้วยบีแวกซ์ ที่เติมน้ำมันหอมระเหยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆกัน ด้วยวิธีการเคลือบกระดาษด้วยแท่งขดลวด (coating rod, No 10) พบว่าสมบัติทางเชิงกลของกระดาษตามแนวขนานเครื่อง (MD) ที่เติมน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นมีผลทำให้คุณสมบัติดัชนีความต้านทานแรงดึง และดัชนีการต้านทานการหักพับลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 1) และคุณสมบัติทางเชิงกลของกระดาษตามแนวขวางเครื่อง (CD) กระดาษที่เติม

น้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นมีผลทำให้คุณสมบัติทางเชิงกลลดลง ได้แก่ ดัชนีความต้านทานแรงดึง ดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาด และค่าการต้านทานการหักพับซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิต จากการทดสอบกระดาษจะเห็นได้ว่ากระดาษที่เคลือบด้วยบีแวกซ์และเติมน้ำมันหอมระเหย มีผลทำให้กระดาษตามแนวขนานเครื่องและแนวขวางเครื่องมีความแข็งแรงลดลงในทิศทางตรงกันข้ามกับการเพิ่มน้ำมันหอมระเหย (ตารางที่ 1 และ 2) ส่วนคุณสมบัติทางด้านความหนา ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ และการดูดซึมน้ำของกระดาษ (ตารางที่ 3) พบว่าในด้านความหนาของกระดาษกระดาษที่เคลือบด้วยบีแวกซ์ที่เติมน้ำมันหอมระเหยจะมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่วนใหญ่ค่าความหนาที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ ส่วนใหญ่ค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติยกเว้นกระดาษที่เติมน้ำมันหอมระเหยร้อยละ 10 ซึ่งให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 2.04 กิโลปาสคาลตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของน้ำมันหอมระเหยทำให้การยึดเหนี่ยวของเส้นใยลดลง สำหรับค่าการดูดซึมน้ำการเพิ่มน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นมีผลทำให้กระดาษที่เคลือบมีการต้านทานการดูดซึมน้ำมากขึ้น จะพบว่าการเพิ่มน้ำมันหอมระเหยที่ร้อยละ 4 6 8 และ 10 มีค่าการดูดซึมน้ำไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ และจะเห็นได้ว่าการเพิ่มน้ำมันหอมระเหยในสูตรเคลือบจะส่งเสริมการต้านการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอีกด้วย และถ้าเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.170-2550) กับคุณลักษณะที่ต้องการของกระดาษถุงชั้นเดียว กระดาษที่เคลือบด้วยบีแวกซ์และเติมน้ำมันหอมระเหยจากการทดลองนี้ ผ่านเกณฑ์สามารถทำถุงกระดาษชั้นเดียวได้

Table 1 Comparison of physical properties of paper coated with beeswax emulsion containing the essential oil at different concentrations in machine direction (MD).

Treatment	Properties			
	Basic Weight, (g/m^2)	Tensile index, (Nm. /g.)	Tearing index, ($mN.m^2/g.$)	Folding resistance, (times)
control	113.83±0.85^{d}	64.52±1.9^{a}	8.67±0.12^{a}	124.67±8.08^{a}
0%	137.33±2.85^{a}	61.57±0.55^{b}	9.38±1.8^{a}	67.33±10.01^{b}
2%	136.23±3.52^{ab}	60.79±1.0^{b}	8.1±0.33^{a}	68±19.0^{b}
4%	131.2±1.65^{c}	61.28±1.32^{b}	8.95±0.86^{a}	49.67±8.62^{bc}
6%	132.33±3.29^{bc}	60.28±0.5^{b}	8.91±0.31^{a}	64±9.54^{b}
8%	130.53±1.8^{c}	54.44±1.04^{c}	9.54±0.34^{a}	42.67±3.06^{c}
10%	132.33±0.78^{bc}	59.97±2.28^{b}	8.71±0.93^{a}	38.33±1.53^{c}
R^2	0.934	0.863	0.285	0.915

Values in a column followed by the same letter are not significantly difference at p=0.05

Table 2 Comparison of physical properties of paper coated with beeswax emulsion containing the essential oil at different concentrations in cross machine direction (CD).

Treatment	Properties			
	Basic Weight, (g/m^2)	Tensile index, (Nm. /g.)	Tearing index, ($mN.m^2/g.$)	Folding resistance, (times)
control	113.83 ± 0.85^{d}	26.02 ± 0.91^{a}	8.55 ± 0.89^{a}	27.67 ± 4.73^{a}
0%	137.33 ± 2.85^{a}	20.15 ± 1.2^{bc}	7.11 ± 0.61^{b}	16.67 ± 2.31^{b}
2%	136.23 ± 3.52^{ab}	20.96 ± 0.73^{b}	6.15 ± 0.31^{c}	15 ± 1^{bc}
4%	131.2 ± 1.65^{c}	20.76 ± 0.76^{b}	6.68 ± 0.32^{bc}	13.33 ± 2.52^{bc}
6%	132.33 ± 3.29^{bc}	20.59 ± 0.57^{b}	6.45 ± 0.16^{bc}	13.67 ± 1.15^{bc}
8%	130.53 ± 1.8^{c}	18.71 ± 0.29^{d}	6.49 ± 0.11^{bc}	10.67 ± 0.58^{c}
10%	132.33 ± 0.78^{bc}	18.95 ± 0.29^{cd}	6.3 ± 0.24^{bc}	11.67 ± 0.58^{c}
R^2	0.938	0.932	0.808	0.888

Values in a column followed by the same letter are not significantly difference at p=0.05

Table 3 Comparison of physical properties and water absorption of paper coated with beeswax emulsion containing the essential oil at different concentrations.

Treatment	Properties		
	Thickness, (mm)	Burst index, ($kPa.m^2/g$)	Water absorptiveness (g/m^2)
control	0.174 ± 0.002^{c}	2.48 ± 0.15^{a}	13.7 ± 1.75^{c}
0%	0.199 ± 0.003^{ab}	2.43 ± 0.1^{a}	9.13 ± 1.31^{b}
2%	0.204 ± 0.002^{a}	2.45 ± 0.03^{a}	8.11 ± 1.12^{b}
4%	0.196 ± 0.003^{b}	2.45 ± 0.24^{a}	2.24 ± 0.61^{a}
6%	0.202 ± 0.004^{a}	2.25 ± 0.1^{ab}	2.64 ± 1.4^{a}
8%	0.202 ± 0.004^{ab}	2.25 ± 0.13^{ab}	1.41 ± 0.17^{a}
10%	0.204 ± 0.005^{a}	2.04 ± 0.14^{b}	0.68 ± 0.1^{a}
R^2	0.921	0.631	0.963

Values in a column followed by the same letter are not significantly difference at p=0.05

ผลการทดสอบการต้านเชื้อราของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเคลือบน้ำมันหอมระเหย

จากการทดลองพบว่าผลการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่เคลือบด้วยบีแวกซ์ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหย พบว่าน้ำมันหอมระเหยที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 และ 10 มีแนวโน้มในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ดีที่สุด เนื่องจากระดับความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยที่ร้อยละ 8 และ 10 บาดแผลการเข้าทำลายของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ทำลายไม่ทั้งหมดของผลมะม่วง ยังสามารถวัดเส้นผ่านศูนย์กลางความกว้างของบาดแผลได้ ดังนั้นระดับความเข้มข้นนี้มีผลยังยั้งการเจริญของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ได้ จากตารางที่ 4 ชี้ให้เห็นว่าบาดแผลที่เกิดจากเชื้อรามีความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้น คือ ใน 3 และ 5 วัน สำหรับการทดลองนี้สังเกตเห็นได้ว่าน้ำมันหอมระเหยที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มในการต้านเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ได้

Table 4 Diameters of rotten mangoes after storing in paper bags coated with beeswax emulsion containing the essential oil at different concentrations.

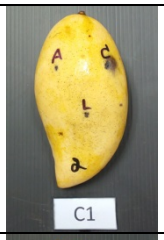
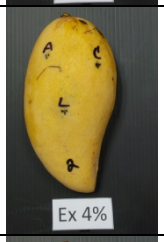
Concentrations of essential oil (%)	Diameter of rot (mm)[a]		
	3 day	5 day	7 day
C1*	11.22±5	32.11±5	Full
0	5.67±0.49	32.67±1.53	Full
2	9.22±1	29.44±3.21	Full
4	8.78±0.9	24.67±2.89	Full
6	8.44±0.82	33.00±3.61	Full
8	5.22±0.71	17.22±1.1	33.00±1.41
10	6.00±0.71	23.33±2.12	49.33±5.03

*C1 uncoated paper bags

[a] inoculated with *colletrtrichum gloeosporioides*

สำหรับผลการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Aspergillus niger* และ *Lasiodiplodia theobromae* ของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่เคลือบน้ำมันสูตรผสมระหว่างน้ำมันอบเชยและน้ำมันยูคาลิปตัสผสมน้ำมันเสม็ดขาวนั้น พบว่าความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลางบาดแผลของผลมะม่วงที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไม่มาก รวมถึงถุงกระดาษที่ไม่เคลือบสารด้วย ซึ่งอาจจะสันนิษฐานได้ว่าการปลูกเชื้อรา *Aspergillus niger* และ *Lasiodiplodia theobromae* ในผลมะม่วงไม่ติดเชื้อทำให้ไม่สามารถวัดความเปลี่ยนแปลงได้ ดังภาพในตารางที่ 5

Table 5 Mangoes after storing in paper bags coated with beeswax emulsion containing the essential oil at different concentrations.

Concentrations of essential oil (%)	Day*		
	3	5	7
C1 uncoated			
0			
2			
4			
6			
8			
10			

* inoculated with *colletrtrichum gloeosporioides*

สรุป

กระดาษเมื่อนำมาเคลือบด้วยสารเคลือบที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยสูตรผสมระหว่างน้ำมันอบเชยและน้ำมันยูคาลิปตัสผสมน้ำมันเสม็ดขาว จะทำให้คุณสมบัติเชิงกลของกระดาษ ได้แก่ ดัชนีความต้านทานแรงดึง ดัชนีความต้านทานแรงฉีกขาด ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ และการต้านทานการหักพับ ลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งในแนวขนานเครื่องและแนวขวางเครื่องของกระดาษ แต่ยังคงมีความแข็งแรงเพียงพอที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นถุงบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อเก็บรักษามะม่วงหลังการเก็บเกี่ยวได้ นอกจากนี้การเติมน้ำมันหอมระเหยสูตรผสมลงไปในสารเคลือบยังทำให้ความสามารถในการต้านทานการดูดซึมน้ำของกระดาษดีขึ้น

การใช้ถุงบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อเก็บรักษามะม่วงน้ำดอกไม้ พบว่าถุงกระดาษที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่เติมน้ำมันหอมระเหยสูตรผสมระหว่างน้ำมันอบเชยและน้ำมันยูคาลิปตัสผสมน้ำมันเสม็ดขาวที่ความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยร้อยละ 8 และ 10 สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *C. gloeosporioides* ได้

เอกสารอ้างอิง

Christoph, F., Kaulfers, P.-M., Stahl-Biskup, E., 2000. A comparative study of the in vitro antimicrobial activity of tea tree oils s.l. with special reference to the activity of b-triketones. **Planta Medica** 66, 556–560.

Khwaldia, K., Arab-Tehrany, E., Desobry, S., 2010. Biopolymer coatings on paper packaging materials. Comprehensive Review in **Food Science and Food Safety**. 9, 82-91.

Rodriguez, A., Batlle, R., Nerin, C., 2007. The use of natural essential oils as antimicrobial solutions in paper packaging. Part II. **Prog. Org. Coat**. 60, 33-38.

Rodriguez, A., Nerin, C., Batlle, R., 2008. New cinnamon-based active paper packaging against *Rhizopusstolonifer* Food Spoilage. **Journal. Agric. Food Chem**. 56, 6364-6369.

Salman. M., J. Anwar, Waheed-uz-Zaman, MU. Shafique and A. Irfan., 2008. Preparation of oil/water emulsions of paraffin and bees waxes with water. **Journal of Scientific Research**, Vol. XXXVIII, No. 2

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2550. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระดาษเหนียว** มอก. 170-2550.

สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของสารให้กลิ่นสำคัญของใบมะกรูดด้วยสตาร์ชถั่วเขียวและการปลดปล่อยที่ค่าพีเอชต่างกัน

Inclusion Complexes of Aroma Active Compounds of Kaffir Lime Leaves with Mung Bean Starch and their Release at Various pH Values

ณฐิฒา รอดขวัญ[1] และ วรรณี จิรภาคย์กุล[1*]

Natita Rodkwan[1] and Wannee Jirapakkul[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกักเก็บของสารให้กลิ่นสำคัญของใบมะกรูด 3 ชนิด คือ linalool, citronellal และ citronellol ในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันด้วยสตาร์ชถั่วเขียวและศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการปลดปล่อยสารให้กลิ่นจากสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ โดยวิเคราะห์ปริมาณสารให้กลิ่นที่ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันด้วยเครื่อง gas chromatography-flame ionization detector (GC-FID) พบว่า linalool, citronellal และ citronellol ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้ 1.21, 0.37, 1.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดย citronellal มีค่าการละลายน้ำต่ำมาก จึงทำให้ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้ต่ำกว่า linalool และ citronellol อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนั้นการปลดปล่อยสารให้กลิ่นจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันด้วยสตาร์ชถั่วเขียว พบว่าสารให้กลิ่นทั้ง 3 ชนิด ที่ค่าพีเอช 9 มีการปลดปล่อยสารให้กลิ่นสูงกว่าที่ค่าพีเอช 3 และ 7 จากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการเพิ่มความคงตัวและการปลดปล่อยสารให้กลิ่นจากสารประกอบเชิงซ้อนได้

ABSTRACT

The objectives of this study were to determine the entrapment of three aroma active compounds of kaffir lime leaves (linalool, citronellal and citronellol) with mung bean starch and the effect of pH on the release of those compounds. The result from gas chromatography-flame ionization detector (GC-FID) analysis showed that linalool, citronellal and citronellol were entrapped at 1.21, 0.37 and 1.06 %, respectively. The entrapment percentage of citronellal was significantly lower ($P \leq 0.05$) due to its low water solubility. Furthermore, alkaline pH had a significant effect ($P \leq 0.05$) on the release of these three aroma compounds from their complexes. At pH 9 aroma compounds were released at higher amount than those at pH 3 and 7. This study showed that inclusion complexes could be used for aroma compounds to provide stability and controlled release function of complexes.

Key Words: inclusion complexes, aroma compound, mung bean starch, pH, kaffir lime leaves, release

* Corresponding author; e-mail address: **fagiwnc@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Argo-Industry, Kasetsart University, Bang Khen, Bangkok 10900

คำนำ

กลิ่นในอาหารเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถบ่งบอกคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภคได้ แต่เนื่องจากสารให้กลิ่นเป็นสารระเหย จึงมีข้อจำกัดในด้านความคงตัวในสภาวะต่างๆ ต่ำ จึงได้มีการใช้เทคนิคเอนแคปซูเลชัน (encapsulation) เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัว ลดการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นจากกระบวนการแปรรูป และสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารให้กลิ่นในผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน(inclusion complexes) เป็นวิธีหนึ่งในการเอนแคปซูเลชันโดยนิยมใช้พอลิเมอร์ชีวภาพที่บริโภคได้ เช่น สตาร์ช (starch) มาเป็นตัวห่อหุ้มสาร เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก มีความปลอดภัยในการใช้เป็นส่วนผสมอาหาร

สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์ 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) และอะไมโล-เพคติน (amylopectin) โดยในสภาวะที่มีลิแกนด์จะเกิดการเหนี่ยวนำโมเลกุลอะไมโลสที่มีลักษณะเฉพาะ สายโซ่อะไมโลสเดี่ยวจะบิดเป็นเกลียวม้วนแบบหมุนวนซ้าย (left-handed single helix) โดยพันล้อมรอบโมเลกุลลิแกนด์เอาไว้ ซึ่งสารลิแกนด์จะหันด้านปลายที่มีขั้วออกทางด้านนอกของสายเกลียว และจับส่วนที่ไม่มีขั้วไว้ในช่องว่างให้อยู่ในสภาพสารประกอบเชิงซ้อน (Itthisoponkul, 2012) จากงานวิจัยของ Jouquand *et al*. (2006) พบว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้สูง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำสตาร์ชถั่วเขียวมาใช้ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารให้กลิ่น เนื่องจากสตาร์ชถั่วเขียวมีปริมาณอะไมโลสสูง คือ 61.98 กรัมต่อสตาร์ชถั่วเขียว 100 กรัม (ณัฏฐ์, 2550)

สารให้กลิ่นที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารให้กลิ่นสำคัญในใบมะกรูด 3 ชนิด คือ linalool, citronellal และ citronellol ในปี 2012 Wongpornchai รายงานสารระเหยในใบมะกรูดสดวิเคราะห์ด้วยวิธี headspace SPME-GC-MS มี citronellal 48.20%, citronellol 14.25%, และ linalool 5.13% ซึ่งสารทั้ง 3 ชนิดนี้พบในใบมะกรูดสดในปริมาณสูงและเป็นสารให้กลิ่นสำคัญในใบมะกรูด โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jirapakkul *et al*. (2013) ซึ่งศึกษาสารให้กลิ่นในใบมะกรูดสดด้วยวิธี Aroma Extract Dilution Analysis (AEDA) พบว่า linalool, citronellal, citronellol เป็นสารให้กลิ่นที่สำคัญในใบมะกรูดเช่นเดียวกัน โดยในงานวิจัยนี้นอกจากการศึกษาสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของสตาร์ชถั่วเขียวกับสารให้กลิ่นแล้วยังศึกษาการปลดปล่อยสารให้กลิ่นทั้ง 3 ชนิด ออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน ในสภาวะที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน เนื่องจากพีเอชมีผลต่อการทำลายโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้สภาวะการปลดปล่อยสารให้กลิ่นในผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างเหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการ

1. สารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันของสตาร์ชถั่วเขียวกับสารให้กลิ่น

1.1 การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนอินคลูชันของสตาร์ชถั่วเขียวกับสารให้กลิ่น

นำสตาร์ชถั่วเขียวทางการค้ากระจายตัวในน้ำกลั่น (0.8 %, w/v) จากนั้นนำเข้าเครื่องรีทอร์ตที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ลดอุณหภูมิลงโดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เติมสารให้กลิ่นทั้ง 3 ชนิด คือ linalool, citronellal และ citronellol ในปริมาณที่เท่ากันคือ 0.4 % จากนั้นคงไว้ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่งโมง ปิดอ่างควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ ทิ้งไว้ประมาณ 18 ชั่วโมง เพื่อให้สตาร์ชถั่วเขียวและสารให้กลิ่นเกิดเป็นสารประกอบ

เชิงซ้อนแบบอินคลูชันโดยการตกตะกอน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 12,000 xg เป็นเวลา 20 นาที และ นำส่วนของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) โดยใส่ตู้แช่แข็ง -40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำตัวอย่างใส่ถาดและวางในตัวเครื่องเปิด vacuum เพื่อให้ระบบเป็นสูญญากาศ ใช้เวลาประมาณ 8 ชั่วโมงในการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง จากนั้นคำนวณผลผลิตร้อยละ (% yield) ของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันที่ได้โดยคำนวนจากสารประกอบเชิงซ้อนที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อปริมาณของสตาร์ชถั่วเขียวที่ใช้เริ่มต้นและเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ต่อไป (Tapanapunnitikul *et al*., 2008)

1.2 การสกัดสารให้กลิ่นออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน

ทำการล้างผิวสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันที่ได้จากข้อ 1.1 เพื่อกำจัดสารให้กลิ่นที่เกาะบริเวณผิวภายนอกออก ล้างผิวโดยใช้เฮกเซน 4 มิลลิลิตรต่อสารประกอบเชิงซ้อน 100 กรัม เขย่าด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก 20 นาทีแล้ววางทิ้งไว้ให้แห้งใน fume hood จากนั้นนำส่วนของสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน 50 มิลลิกรัม ผสมสารละลาย 1% โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิลิตร และสารละลาย internal standard (2-undecanol) จากนั้นวางบนเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก 30 นาที แล้วเติมสารละลายเฮกเซน 3 มิลลิลิตร แล้วเขย่าต่อด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ดูดส่วนสารละลายเก็บไว้โดยทำการสกัดด้วยสารละลายเฮกเซนทั้งหมด 3 ครั้ง เทสารที่สกัดได้ผ่านโซเดียมซัลเฟตปราศจากน้ำเพื่อกำจัดความชื้น เก็บตัวอย่างในขวดแก้วสีชาเพื่อใช้วิเคราะห์ต่อไป

1.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารให้กลิ่นที่ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน

วิเคราะห์ปริมาณของตัวอย่างที่สกัดได้จากข้อ 1.2 จำนวน 1 ไมโครลิตรด้วยเครื่อง gas chromatography-flame ionization detector (GC-FID) เพื่อคำนวณปริมาณของสารให้กลิ่นที่ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน โดยใช้สภาวะของเครื่องแบบ splitless mode ตั้งอุณหภูมิของ inlet ที่ 250 องศาเซลเซียส ก๊าซฮีเลียม เป็น carrier gas ที่อัตราการไหลคงที่ที่ 1 มิลลิลิตร/นาที แยกสารด้วยแคปิลารีคอลัมน์ชนิด HP-5 ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร ชั้นเคลือบหนา 0.25 ไมโครเมตร โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียส/นาที จนอุณหภูมิถึง 180 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 250 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 5 นาที ระบุสารให้กลิ่นแต่ละชนิดโดยเปรียบเทียบกับค่า retention time (RI) และเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานของสารให้กลิ่นชนิดนั้นๆ คำนวณหาปริมาณสารโดยการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีคของสารให้กลิ่นแต่ละชนิดกับพื้นที่ใต้พีคของสาร internal standard ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน และรายงานเป็นความเข้มข้นสัมพัทธ์ของสารให้กลิ่นชนิดนั้นๆ ต่อน้ำหนักตัวอย่าง (ไมโครกรัมต่อกรัม; ppm)

2. ผลของค่าพีเอชต่อการปลดปล่อยสารให้กลิ่นออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน

การวิเคราะห์ผลของค่าพีเอชต่อการปลดปล่อยสารให้กลิ่นออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 3, 7, และ 9 ด้วยเทคนิค Headspace Solid Phase Micro Extraction (SPME) โดยนำสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันที่ล้างผิวแล้ว จำนวน 10 มิลลิกรัม เติม internal standard 15 ไมโครลิตร เติมสารละลายบัฟเฟอร์ซิตริกพีเอช 3 หรือสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 7และ 9 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้น

ดูดสารละลายมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้ว (vial) 20 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายบัฟเฟอร์ซิตริกหรือสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต 4 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้น adsorption ด้วยไฟเบอร์ชนิด DVB/CAR/PDMS เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไป desorption ที่เครื่อง gas chromatography-flame ionization detector (GC-FID) เป็นเวลา 10 นาที สภาวะการทดลองดังข้อ 1.3

3. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ข้อมูลโดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ $p \leq 0.05$ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Dancan' s multiple range test

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การวิเคราะห์ปริมาณสารให้กลิ่นที่ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน

สารให้กลิ่นสำคัญในใบมะกรูด 3 ชนิด คือ linalool, citronellal และ citronellol โดย linalool มีลักษณะกลิ่นหวานคล้ายดอกไม้ citronellal มีลักษณะกลิ่นซิตรัส กลิ่นเขียว กลิ่นใบมะกรูด และ citronellol มีลักษณะกลิ่นใบมะกรูดสด กลิ่นซิตรัส (Jirapakkul, 2013) โดยสารให้กลิ่นทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำมาเตรียมเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอินคลูชันกับสตาร์ชถั่วเขียว พบว่า % yield ของสารประกอบเชิงซ้อนอินคลูชันมีค่าเท่ากับ 32.68 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการสกัดเพื่อวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารให้กลิ่นที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันด้วยสตาร์ชถั่วเขียวได้โดยเครื่อง GC-FID แสดงดัง Figure 1 ความเข้มข้นสัมพัทธ์ของ linalool, citronellal และ citronellol มีค่าเท่ากับ 12,415, 3,767, 10,546 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

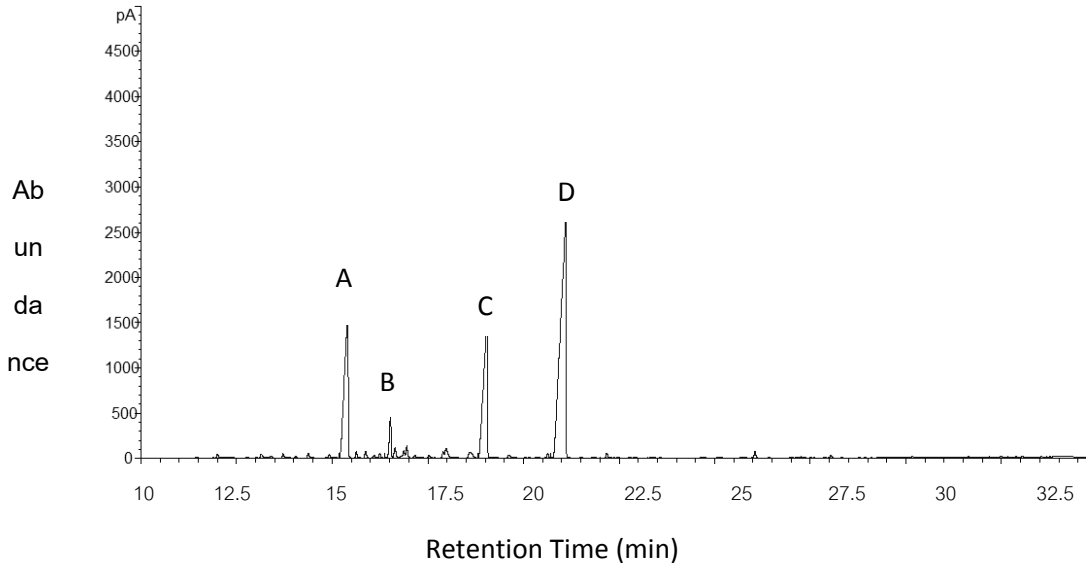


Figure 1 Chromatogram of aroma compounds entrapment in mung bean starch. (A) linalool, (B) citronellal, (C) citronellol and (D) internal standard.

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของสารให้กลิ่นทั้ง 3 ชนิด ที่ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน พบว่า linalool, citronellal และ citronellol ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้ 1.21, 0.37 และ 1.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดย citronellal ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้ต่ำกว่า linalool และ citronellol อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายน้ำของ linalool, citronellal และ citronellol พบว่ามีค่าการละลายน้ำ 1.336, 0.038, 0.322 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ (Cal, 2006) โดยค่าการละลายน้ำของ citronellal มีค่าต่ำกว่า linalool และ citronellol จึงทำให้ถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้ต่ำเนื่องจากสารต้องมีปริมาณมากพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tapanapunnitikul (2008) ที่ได้ทำการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนอินคลูชันกับสาร 4 ชนิด คือ limonene, cymene, thymol และ menthone โดยพบว่า limonene และ cymene เป็นสารที่มีค่าการละลายน้ำต่ำจึงทำให้ถูกกักเก็บได้น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ thymol และ menthone เป็นสารที่มีค่าการละลายน้ำสูงกว่าจึงถูกกักเก็บได้มากกว่า คือ 5.8, 10.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์การกักเก็บสารที่ได้ค่อนข้างต่ำแต่เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันเป็นการกักการสารไว้ภายในโมเลกุลของอะไมโลสจึงอาจจะทำให้มีความคงทนและสามารถเก็บได้นานมากขึ้น ซึ่งอาจเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีอายุการเก็บรักษานาน เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูป

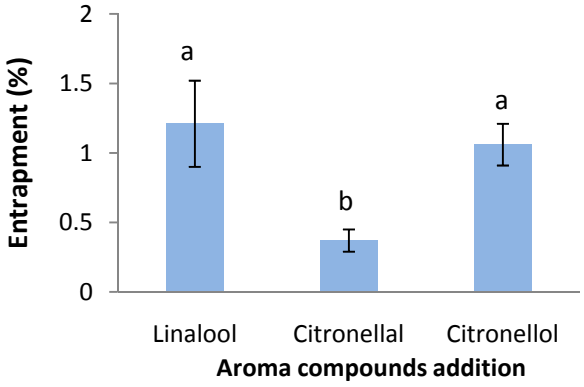


Figure 2 Entrapment of aroma compounds with mung bean starch. a and b indicate significant differences between the samples ($P \leq 0.05$)

2. การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการปลดปล่อยสารให้กลิ่นออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน

การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการปลดปล่อยสารให้กลิ่นทั้ง 3 ชนิด คือ linalool, citronellal และ citronellol โดยศึกษาสภาวะการปลดปล่อยที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 3, 7, และ 9 โดยใช้เทคนิค Headspace Solid Phase Micro Extraction (SPME) พบว่าที่ค่าพีเอชต่างกันมีผลทำให้การปลดปล่อยสารให้กลิ่นออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันแตกต่างกัน โดยค่าพีเอชในช่วงด่างสารให้กลิ่นแต่ละชนิดจะมีการปลดปล่อยออกมามากขึ้น

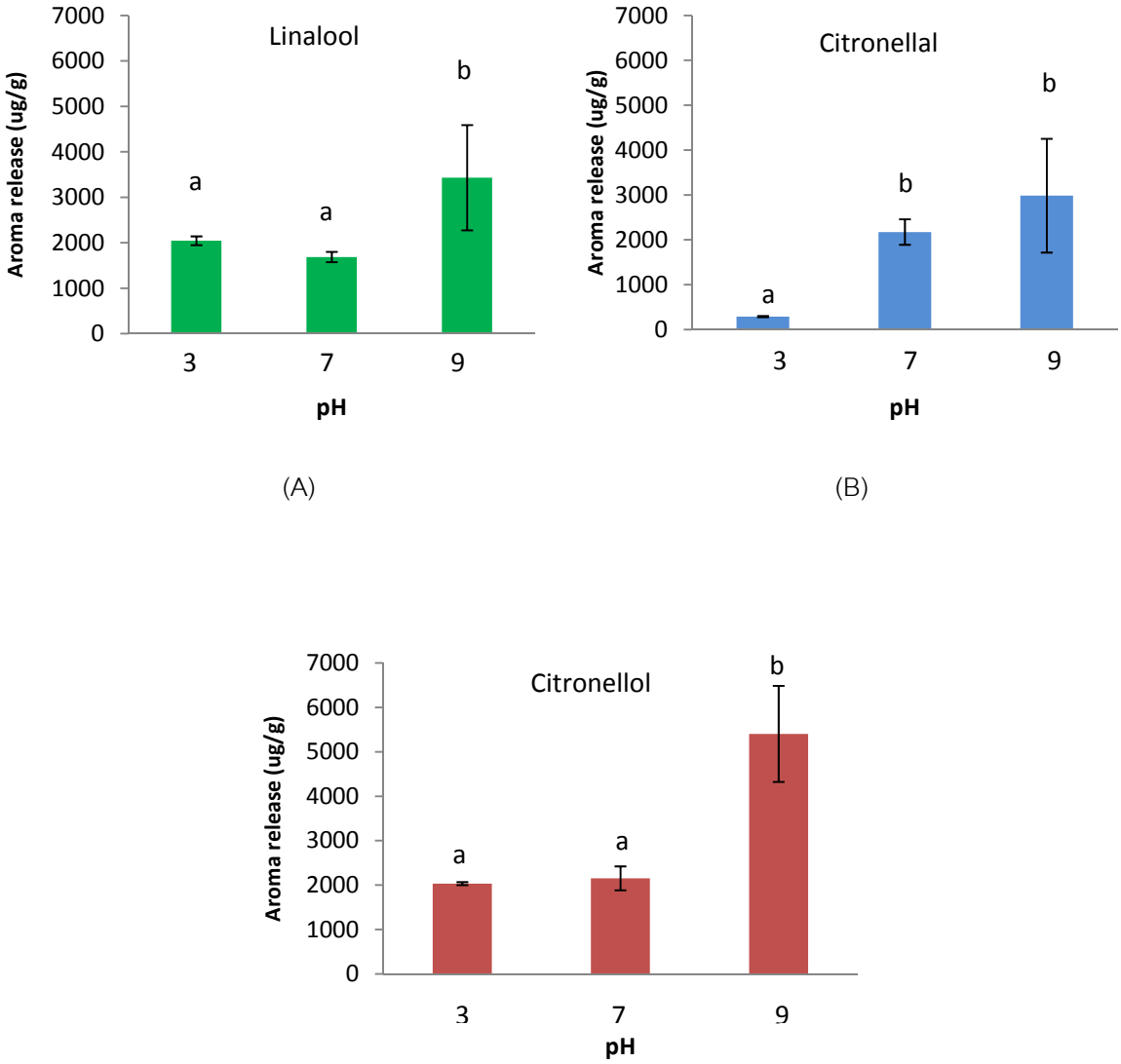


Figure 3 Effect of pH on aroma compounds release from the complex at pH 3, 7, 9 (A) linalool, (B) citronellal, (C) citronellol. a and b indicate significant differences between the samples ($P \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาที่ค่าพีเอช 3 และ 9 ของสารให้กลิ่นทั้ง 3 ชนิด พบว่า linalool มีการปลดปล่อยออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน 2,044 และ 3,431 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ citronellal มีการปลดปล่อยออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน 287 และ 2,983 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และ citronellol มีการปลดปล่อยออกจากสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชัน 2,032 และ 5,404 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดัง Figure 3 ซึ่งเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นมีผลทำให้การปลดปล่อยของสารให้กลิ่นมากขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Szejtli and Bankyelod (1975) ทำการทดลองสารประกอบเชิงซ้อนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวด้วยอะไมโลสและไซโคลเด็กซ์ทริน พบว่าการใช้สารละลายด่างมีผลทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างเกลียวของอะไมโลส (helices) เกิดการแตกออกทำให้สารที่ถูกกักเก็บไว้ภายในโครงสร้างของเกลียวของอะไมโลสถูกปลดปล่อยออกมาได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า citronellal มีปริมาณการปลดปล่อยออกจากสารประกอบ

เชิงซ้อนได้ในปริมาณที่ใกล้เคียงกับ linalool แม้ว่าจะมีปริมาณการกักเก็บที่ต่ำกว่า โดยที่ค่าพีเอชเป็นด่างมีการปลดปล่อยสารออกมาได้มาก อาจเนื่องจากพันธะของ citronellal กับโครงสร้างสตาร์ชถูกสลายได้มาก จึงถูกปลดปล่อยออกมาได้สูง

สรุป

สารให้กลิ่นสำคัญในใบมะกรูดทั้ง 3 ชนิด คือ linalool, citronellal และ citronellol สามารถถูกกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันกับสตาร์ชถั่วเขียวได้ โดยสารให้กลิ่นแต่ละชนิดถูกกักเก็บในปริมาณที่ต่างกัน โดยสารให้กลิ่นที่มีค่าความสามารถในการละลายน้ำสูงมีค่าการกักเก็บในสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินคลูชันได้มากกว่าสารให้กลิ่นที่ละลายน้ำได้ต่ำ ส่วนการปลดปล่อยสารให้กลิ่นออกจากสารประกอบเชิงซ้อนที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน พบว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นสารให้กลิ่นมีแนวโน้มปลดปล่อยออกมาได้มากขึ้น จากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงความคงตัวของสารให้กลิ่นและสามารถเลือกใช้สภาวะในการปลดปล่อยสารให้กลิ่นได้อย่างเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหาร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ณัฏฐ์ โชติจิรัฐิติกาล. 2550. **ผลของการดัดแปรโดยการย่อยด้วยกรด ออกซิเดชัน และการเชื่อมข้ามต่อคุณสมบัติของสตาร์ชถั่วเขียว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

Ades, H., E. Kesselman, Y. Ungar and E. Shimoni. 2012. Complexation with starch for encapsulation and controlled release of menthone and menthol. **LWT-Food Science and Technology** 45: 277-288.

Cal, K. 2006. Aqueous solubility of liquid monoterpene at 293 k and relationship with calculated log P value. **The Pharmaceutical Society of Japan** 126(4): 307-309.

Itthisoponkul, T. 2012. Preparation and application of amylose inclusion complexes in nutrient delivery system. **Burapha Sci. J.** 1: 157-164.

Itthisoponkul, T., J.R. Mitchell, A.J. Taylor and I.A. Farhat. 2007. Inclusion complexes of tapioca starch with flavor compound. **Carbohydrate Polymers** 69: 106-115.

Jirapakkul, W., P. Tinchan and S. Chaiseri. 2013. Effect of drying temperature on key odourants in kaffir lime (Citrus hystrix D.C., Rutaceae) leaves. **International Journal of Food Science and Technology** 48(1): 143-149.

Jouquand, C., V. Ducruet and Le.P. Bail. 2006. Formation of amylose complexes with C6-aroma compounds in starch dispersions and its impact on retention. **Food Chemistry** 96: 461-470.

Nedovic, V., A. Kalusevic, V. Manojlovic, S. Levic and B. Bugarski. 2011. An overview of encapsulation technologies for food applications. **Procedia Food Science** 1: 1806-1815.

Szejtli, J and E. Bankyelod. 1975. Inclusion complexes of unsaturated fatty-acids with amylose and cyclodextrin. **Starke** 27(11): 368-376.

Tapanapunnitikul, O., S. Chaiseri, D.G. Peterson and D.B. Thompson. 2008. Water solubility of flavor compounds influences formation of flavor inclusion complexes from dispersed high-amylose maize starch. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 56: 220-22.

Wongpornchai, S. 2012. Kaffir lime leaf, pp. 319-328. *In* K. V. Peter, ed. **Handbook of herbs and spices 2nd ed.** Woodhead, England.

Zasshi, Y. 2006. Aqueous solubility of liquid monoterpenes at 293 k and relationship with calculated log P value. **The Pharmaceutical Society of Japan** 126(4): 307-309.

การยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในห้องน้ำสาธารณะด้วยน้ำมันหอมระเหยพลู น้ำมันหอมระเหยพลูผสมกับน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพร และสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่มีน้ำมันหอมระเหยพลูเป็นองค์ประกอบหลัก

Antimicrobial Activities of Betel Oil, Mixed Betel Oil with Herbal Essential oil, Essential Oils Recipe Contained Betel Oil as Main Ingredient against Microorganism Contaminated in Public Toilets

ลลิตา คชารัตน์[1] ประภัสสร รักถาวร[1*] อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ[1] และเกสรี กลิ่นสุคนธ์[1]

Lalita Khacharat[1], Prapassorn rugthaworn[1*], Udomlak sukatta[1] and Ketsaree Klinsukhon[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในห้องน้ำสาธารณะ ด้วยน้ำมันหอมระเหยพลู และสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยพลูกับน้ำมันหอมระเหยสมุนไพร 4 ชนิด ได้แก่ กานพลู ลาเวนเดอร์ ยูคาลิปตัส และทีทรี กับเชื้อแบคทีเรียจำนวน 9 สายพันธุ์, เชื้อรา จำนวน 7 สายพันธุ์ และเชื้อยีสต์จำนวน 1 สายพันธุ์ พบว่า สูตรผสมน้ำมันพลูกับน้ำมันทั้ง 4 ชนิด มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ทดสอบทุกชนิดได้ดี จึงคัดเลือกน้ำมันหอมระเหยที่มีกลิ่นหอมมาใช้เป็นส่วนผสมในสูตรร่วมกับน้ำมันหอมระเหยพลู โดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ พลู : กานพลู : ลาเวนเดอร์ : ยูคาลิปตัส เท่ากับ 5:1:2:2 มีค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ทดสอบทุกชนิดเท่ากับ 128 - 4,096 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยด้วยเครื่อง GC-MS พบ 1,8-ซินีออล, ลินาโลออล, ไอโซยูจีนอล , ยูจีนอล และสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่ได้มีศักยภาพในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในห้องน้ำสาธารณะต่อไป

ABSTRACT

Antimicrobial activity of betel oil, and 4 mixed oil: betel and clove oil, betel and lavender oil, betel and eucalyptus oil, betel and tea tree oil against microorganism contaminated in public toilets consist of 9 bacteria, 7 fungal and 1 yeast strains were evaluated. The result showed that betel oil and all of 4 mixed showed high efficacy to inhibit all tested microbes. Essentials oil with good scent were selected to mix in essential oils recipe contained betel oil. The optimal ratio of essential oils recipe consists of betel oil: clove oil: lavender oil: eucalyptus oil at ratio 5:1:2:2. The minimum inhibitory concentrations of essential oils recipe against all tested microbes were 128 - 4,096 µg/ml. Analysis of oil composition using GC-MS showed that 1,8-cineole, linalool, isoeugenol and eugenol were the main compositions of essential oils recipe . These results show that essential oils recipe contained betel oil as main ingredient provided a good potential to develop antimicrobial products to control microorganism contaminated in public toilets.

Key Words: betel oil, antimicrobial activity, essential oils, public toilets

Corresponding author; e-mail address: **aappsr@ku.ac.th**

[1] ห้องปฏิบัติการการเทคโนโลยีสมุนไพรและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สถาบันผลิตผลเกษตรฯ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[1] Unit Research of Herbs and Bioactive compound, KAPI, Kasetsart University

คำนำ

ปัจจุบันในชีวิตประจำวันต้องมีการติดต่อสัมพันธ์กันอยู่เป็นประจำทุกวัน ในขณะเดียวกัน รอบๆ ตัวเราทุกๆ ที่ ทั้งในบ้านและนอกบ้าน ล้วนพบเจอจุลินทรีย์อยู่ตลอดเวลา ดังนั้น เราจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงจุลินทรีย์เหล่านี้ได้ อย่างไรก็ดี จุลินทรีย์เองก็มีความหลากหลายทางชีวภาพสูง มีทั้งชนิดที่ก่อประโยชน์และก่อโทษ ด้านการก่อโทษที่เห็นได้ชัดเจนคือเชื้อโรคชนิดต่างๆ ในชีวิตประจำวันแต่ละวันมีการสัมผัสกับเชื้อโรคตลอดเวลาหากไม่ระมัดระวัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดำเนินกิจกรรมในที่สาธารณะ เช่น ห้องน้ำสาธารณะ ยิ่งมีความเสี่ยงสูงที่จะได้รับเชื้อโรค จุดที่พบเชื้อโรคในห้องน้ำมากที่สุดได้แก่ พื้นห้องน้ำ โถสุขภัณฑ์ ก๊อกน้ำ อ่างล้างมือรวมทั้งบริเวณโดยรอบ ลูกบิดหรือกลอนประตูห้องน้ำ เชื้อโรคที่พบปนเปื้อนในห้องน้ำสาธารณะที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ทำให้ท้องเสียอยู่เสมอได้แก่ เชื้อ *Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa, Staphylococcus aureus* และ *Salmonella choleraesuis* เป็นต้น (ประภัสสร และคณะ, 2553) การติดเชื้อจากห้องน้ำสาธารณะจึงเป็นเรื่องที่พบได้อยู่เสมอ ใบพลูมีน้ำมันหอมระเหย (Betel oil)ประมาณ 0.8-1.8 % โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ประกอบด้วยสารยูจีนอล และเซสควิเทอร์ปีน โดยพบว่า สารสกัดจากใบพลูมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราที่เป็นสาเหตุของกลากเกลื้อนหลายชนิด (วันดี, 2538) น้ำมันพลูมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อราได้ดีกว่าสารสกัดพลู ทั้งนี้อาจเกิดจากสารสำคัญของน้ำมันพลูส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ดี เกิดจากสารสำคัญกลุ่มยูจีนอล และซาวิเบททอล อะซิเตท ซึ่งเป็นสารที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และเชื้อราได้หลายชนิด (ประภัสสร และคณะ, 2553)

เชื้อจุลินทรีย์ในห้องน้ำสาธารณะถือเป็นภัยใกล้ตัวที่ต้องระมัดระวังเพื่อสุขอนามัยที่ดี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาน้ำมันหอมระเหยที่เหมาะจะนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้านเชื้อในห้องน้ำสาธารณะ ซึ่งน้ำมันหอมระเหยจากใบพลูมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และเชื้อราได้ดี แต่กลิ่นของน้ำมันพลูมีข้อจำกัดในการใช้เพราะมีกลิ่นฉุนของสมุนไพรที่ค่อนข้างแรง วิธีที่จะลดกลิ่นฉุนของน้ำมันพลู คือการนำน้ำมันพลูมาผสมกับน้ำมันหอมระเหยชนิดอื่น เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำมันพลูในผลิตภัณฑ์ลง แต่ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ยังคงเดิม

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การทดสอบฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำมันหอมระเหยพลูและน้ำมันหอมระเหยผสมระหว่างน้ำมันหอมระเหยพลูผสมกับน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพร

ทำการสกัดน้ำมันหอมระเหยจากใบพลู, กานพลู และทีทรี โดยการกลั่นด้วยวิธีต้ม (Water Distillation) ตามวิธีการของอุไรวรรณ และคณะ (2547) น้ำมันหอมระเหยยูคาลิปตัส และลาเวนเดอร์จากบริษัท อุตสาหกรรมเครื่องหอมไทย-จีน ทำการทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำมันหอมระเหยพลู และน้ำมันหอมระเหยผสมระหว่างน้ำมันหอมระเหยพลูกับน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพรชนิดอีก 4 ชนิดที่ผ่านการทดสอบความพึงพอใจจากผู้ทดสอบ ได้แก่ กานพลู, ยูคาลิปตัส, ลาเวนเดอร์ และทีทรี ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตรต่อปริมาตร เพื่อยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่พบในห้องน้ำสาธารณะได้แก่ เชื้อแบคทีเรียจำนวน 10 สายพันธุ์ (ประภัสสร และคณะ, 2553) คือ *Staphylococcus aureus* DMST 8840, *Salmonella epidermidis* DMST 15505, *Escherichia coli* TISTR 780, *Salmonella* Typhimurium TISTR 292, *Pseudomonas aeruginosa* TISTR 781, *Shigella flexneri* DMST 4423, *Klebsiella pneumonia* DMST 8216, *Proteus mirabilis* DMST 8212, *Vibrio cholera* DMST 15778 และ *Bacillus cereus* TISTR 687 เชื้อราจำนวน 7 สายพันธุ์ คือ *Aspergillus niger* TISTR 3245,

Aspergillus flavus TISTR 3366, *Penicillium* sp. TISTR 3046, *Cladosporium cladosporioides* TISTR 3286, *Chaetomium globosum* TISTR 3093, *Rhizopus oligosporus* TISTR 3301, *Curvularia lunata* TISTR 3289 และเชื้อยีสต์จำนวน 1 สายพันธุ์ คือ *Candida albicans* TISTR 5779 ทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อยีสต์ โดยวิธี Disc Diffusion method (Mcginnis *et al*., 1996) และทำการทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราด้วยวิธี Contact assay (Alvarez-Castellanos *et al*., 2001)

2. การตรวจหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำมันหอมระเหยพลูและสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่มีน้ำมันหอมระเหยพลูเป็นองค์ประกอบหลัก

วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของน้ำมันหอมระเหยพลู และสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่ได้รับคะแนนความพึงพอใจสูงสุด ซึ่งประกอบด้วย น้ำมันหอมระเหยพลู : กานพลู : ลาเวนเดอร์ : ยูคาลิปตัส ในอัตราส่วน 5: 1: 2: 2 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย เชื้อรา และเชื้อยีสต์ที่พบในห้องน้ำสาธารณะ ด้วยวิธี Microdilution Test (CLSI, 2012) โดยความเข้มข้นเริ่มต้น 65,536 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และเจือจางสารทดสอบด้วยวิธี Two-Fold Dilution จนมีระดับความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 16,384, 8,192, 4,096, 2,048, 1,024, 512, 256, 128, 64, 32,16, 8 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และตรวจสอบการยับยั้งการเจริญของเชื้อ วิธี Resazurin Microtiter Assay Plate Method (Rahman *et al*., 2004)

3. วิเคราะห์หาปริมาณสารองค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหย โดยวิธีแก๊สโครมาโทรกราฟฟี่/แมสสเปคโทรเมทรี (Gas Chromatography/Mass Spectrometry; GC-MS)

วิเคราะห์องค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยพลู และสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่มีน้ำมันหอมระเหยพลูเป็นส่วนผสมหลักโดยวิธีแก๊สโครมาโทรกราฟฟี่/แมสสเปคโทรเมทรี (Gas Chromatography/Mass Spectrometry; GC-MS รุ่น QP5050A, Shimazu, Japan) ทำการวิเคราะห์ตามวิธีของ Sarrou *et al*.(2013)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การทดสอบฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำมันหอมระเหยพลูและน้ำมันหอมระเหยผสมระหว่างน้ำมันหอมระเหยพลูผสมกับน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพร

จากการทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำมันหอมระเหยพลูและน้ำมันหอมระเหยพลูผสมกับน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพรอีก 4 ชนิดที่ผ่านการทดสอบความพึงพอใจจากผู้ทดสอบ ได้แก่ น้ำมันหอมระเหยกานพลู, ยูคาลิปตัส, ลาเวนเดอร์ และทีทรี ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่พบในห้องน้ำสาธารณะ 10 สายพันธุ์ พบว่า น้ำมันหอมระเหยพลูและน้ำมันหอมระเหยพลูผสมกับน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพรมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียที่พบในห้องน้ำสาธารณะ โดยน้ำมันหอมระเหยผสมระหว่างน้ำมันหอมระเหยพลู และน้ำมันหอมระเหยชนิดต่างๆ มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบได้ดีกว่าการใช้น้ำมันหอมระเหยพลูอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (Table1) ยกเว้นการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* และเชื้อ *Vibrio cholerae* น้ำมันหอมระเหยพลูมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์นี้ได้ดีกว่าน้ำมันหอมระเหยพลูผสมกับน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเชื้อทั้งสองสายพันธุ์นี้มีความไวต่อน้ำมันหอมระเหยพลูสูงกว่าน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพรอีก 4 ชนิด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hoque *et al*. (2011) ว่าสารสกัดจากพลูมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* และเชื้อ *Vibrio cholerae* ได้ดี และน้ำมันหอมระเหยพลูและน้ำมันหอมระเหยพลูผสมไม่มีความแตกต่างกันในการยับยั้งเชื้อยีสต์ *Candida albican* ($P>0.05$)

Table 1 Antimicrobial activity of betel oil and mixed betel oil with herbal essential oil against microorganism contaminated in public toilets.

Types of Microorganism	Inhibition zone (mm)				
	Betel oil	betel oil and clove oil	betel oil and eucalyptus oil	betel oil and lavender oil	betel oil and tea tree oil
Bacteria					
Staphylococcus aureus DMST 8840	33.00±1.73[a]	22.33±0.58[c]	26.67±2.31[b]	19.00±1.00[d]	28.00±1.77[b]
Staphylococcus epidermidis DMST 15505	21.33±1.53[c]	26.00±1.73[b]	27.00±1.73[b]	32.00±1.00[a]	29.33±1.53[ab]
Escherichai coli TISTR 780	17.33±1.15[b]	18.67±0.67[b]	17.67±1.53[b]	19.33±1.15[b]	26.00±1.00[a]
Salmonella Typhimurium TISTR 292	17.33±1.15[c]	19.67±0.58[b]	19.67±1.15[b]	18.67±1.15[bc]	24.67±1.53[a]
Pseudomonas aeruginosa TISTR 781	6.00±0.00[d]	10.00±0.01[c]	12.67±1.15[b]	11.67±0.58[b]	14.00±1.00[a]
Shigella flexneri DMST 4423	7.67±0.58[d]	8.00±0.41[d]	14.00±0.71[b]	11.67±0.71[c]	16.33±0.71[a]
Klebsiella pneumoniae DMST 8216	19.00±1.00[c]	22.33±1.15[b]	22.33±1.53[b]	27.00±1.73[a]	23.33±0.58[b]
Proteus mirabilis DMST 8212	12.67±0.58[d]	14.33±0.58[c]	16.00±0.58[b]	11.33±0.58[e]	19.67±0.58[a]
Vibrio cholerae DMST 15778	38.00±0.00[a]	21.33±1.53[d]	20.33±1.15[d]	29.67±0.58[b]	24.33±1.15[c]
Bacillus cereus TISTR 687	21.67±0.58[d]	28.33±1.53[c]	32.00±1.73[b]	36.67±1.53[a]	35.00±1.00[a]
Yeast					
Candida albican TISTR 5779 [ns]	38.00±0.01	44.67±1.73	42.33±2.31	39.67±1.53	39.00±1.00

[-d] Means ± standard deviation (SD). Different letters in the same row indicated significant differences ($P < 0.05$).

[ns] no significant differences ($p > 0.05$)

ผลการยับยั้งการเจริญของเชื้อราที่พบในห้องน้ำสาธารณะจำนวน 7 สายพันธุ์ของน้ำมันหอมระเหยพลูและน้ำมันหอมระเหยพลูผสม พบว่าน้ำมันหอมระเหยผสมระหว่างน้ำมันหอมระเหยพลู และน้ำมันหอมระเหยอีก 4 ชนิด มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *Cha. globosum* , *Cla. cladosporioides* และ *Cur. lunata* ได้ดีกว่าการใช้น้ำมันหอมระเหยพลูชนิดเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) สำหรับการยับยั้งเชื้อ *A. niger* และ *Penicillium* sp. น้ำมันหอมระเหยผสมระหว่างพลูและกานพลู, พลูและยูคาลิปตัส, พลูและลาเวนเดอร์ ยับยั้งเชื้อได้ดีกว่าการใช้น้ำมันหอมระเหยพลูเพียงชนิดเดียว ส่วนฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อ *A. flavus* น้ำมันหอมระเหยผสมระหว่างพลูและกานพลู, พลูและยูคาลิปตัส ยับยั้งเชื้อได้ดี และการยับยั้งเชื้อ *R. microsporus* น้ำมันหอมระเหยพลูผสมมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อนี้ได้ไม่แตกต่างจากการใช้น้ำมันหอมระเหยพลูชนิดเดียว ($p>0.05$) (Table 2)

ผลการทดสอบฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่พบในห้องน้ำสาธารณะ พบว่า เมื่อนำน้ำหอมระเหยชนิดต่างๆ มาผสมกับน้ำมันหอมระเหยพลู น้ำมันหอมระเหยพลูผสมมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่พบในห้องน้ำสาธารณะได้ดี เพื่อลดการใช้น้ำมันพลูซึ่งเป็นน้ำมันที่มีกลิ่นฉุนของสมุนไพรที่ค่อนข้างแรง ดังนั้นจึงทำการคัดเลือกสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยพลู จากผลความพึงพอใจของผู้ทดสอบมาเพื่อใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในห้องน้ำสาธารณะต่อไป โดยสูตรที่ได้รับคะแนนความพึงพอใจสูงสุด คือ อัตราส่วนการผสม พลู:กานพลู:ยูคาลิปตัส:ลาเวนเดอร์ เท่ากับ 5:1:2:2

Table 2 Antifungal activity of betel oil and mixed betel oil with herbal essential oil against fungi contaminated in public toilets.

Types of Fungus	Antifungal index (%)				
	Betel oil	betel oil and clove oil	betel oil and eucalyptus oil	betel oil and lavender oil	betel oil and tea tree oil
Aspergillus niger TISTR 3245	57.06±1.90^{bc}	61.96±1.90^{ab}	64.42±3.01^{a}	59.51±2.33^{ab}	53.99±3.08^{c}
Aspergillus flavus TISTR 3366	48.82±1.93^{c}	65.29±1.44^{a}	57.06±1.44^{b}	50.00±3.47^{c}	50.00±2.66^{c}
Penicillium sp. TISTR 3046	6.82±3.52^{b}	19.32±2.78^{a}	20.45±3.52^{a}	21.59±3.05^{a}	12.50±2.78^{b}
Cladosporium cladosporioides TISTR 3286	22.62±2.92^{c}	39.29±3.91^{b}	35.71±2.26^{b}	41.67±2.92^{b}	67.86±3.91^{a}
Chaetomium globosum TISTR 3093	14.89±3.30^{d}	31.91±3.30^{c}	53.19±2.64^{ab}	54.26±1.70^{a}	40.43±3.30^{bc}
Rhizopus microsporus TISTR 3301	62.96±1.81^{ab}	57.78±3.44^{b}	64.44±2.81^{a}	65.93±2.30^{a}	67.04±2.18^{a}
Curvularia lunata TISTR 328)	43.33±1.86^{e}	67.04±2.95^{a}	52.59±2.69^{d}	55.56±1.41^{c}	58.89±1.86^{b}

$^{a-d}$ Means ± standard deviation (SD). Different letters in the same row indicated significant differences ($P < 0.05$).

2. การตรวจหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำมันหอมระเหยพลูและสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่มีน้ำมันหอมระเหยพลูเป็นองค์ประกอบหลัก

จากการหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เชื้อยีสต์ และเชื้อราของน้ำมันหอมระเหยพลูและสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่มีน้ำมันพลูเป็นองค์ประกอบหลัก (โดยมีอัตราส่วนน้ำมันหอมระเหย พลู : กานพลู : ยูคาลิปตัส: ลาเวนเดอร์ ในอัตราส่วน 5: 1: 2: 2) พบว่า ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของน้ำมันพลูในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ อยู่ในช่วง 128 - 4,096 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในขณะที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของ สูตรผสมน้ำมันหอมระเหยอยู่ในช่วง 512 - 4,096 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (Table 3) ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของน้ำมันหอมระเหยพลูในการยับยั้งเชื้อราทุกชนิด อยู่ในช่วง 128-1,024 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในขณะที่ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของ สูตรผสมน้ำมันหอมระเหยอยู่ในช่วง 128-512 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ยกเว้นประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อรา *Curvularia lunata* TISTR 3289 น้ำมันพลูมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อชนิดนี้ได้ดีกว่า สูตรผสมน้ำมันหอมระเหย (Tabel 3) ในการยับยั้งเชื้อยีสต์ สูตรผสมน้ำมันหอมระเหยมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อยีสต์ *Candida albicans* TISTR 5779 ได้ดีกว่าการใช้น้ำมันหอมระเหยพลูชนิดเดียวโดยมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดเท่ากับ 512 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่มีน้ำมันหอมระเหยพลูเป็นองค์ประกอบหลักมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ได้ดีกว่าน้ำมันหอมระเหยพลูอย่างเดียว ยกเว้น *Staphylococcus aureus* DMST 8840, *Pseudomonas aeruginosa* TISTR 781, *Shigella flexneri* DMST 4423 และ *Curvularia lunata* TISTR 3289 แต่สูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่มีนำมันหอมระเหยพลูเป็นองค์ประกอบหลักยังมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อที่ใช้ทดสอบได้ในระดับความเข้มข้นไม่สูงจนเกินไปและยังช่วยลดกลิ่นฉุนของน้ำมันพลูลงได้ ฉะนั้นสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยจึงเหมาะที่จะนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ยับยั้งจุลินทรีย์ในห้องน้ำสาธารณะมากกว่าน้ำมันหอมระเหยพลูชนิดเดียว

Table 3 Minimal inhibitory concentration of betel oil and essential oils recipe

Types of bacteria	Minimal inhibitory concentration/MIC (μg/ml)	
	Betel oil	essential oils recipe
Bacteria		
Staphylococcus aureus DMST 8840	128	1,024
Staphylococcus epidermidis DMST 15505	2,048	2,048
Escherichai coli TISTR 780	2,048	512
Salmonella Typhimurium TISTR 292	2,048	1,024
Pseudomonas aeruginosa TISTR 781	2,048	4,096
Shigella flexneri DMST 4423	1,024	4,096
Klebsiella pneumoniae DMST 8216	1,024	1,024
Proteus mirabilis DMST 8212	4,096	2,048
Vibrio cholerae DMST 15778	512	512
Bacillus cereus TISTR 687	1,024	1,024
Fungi		
Aspergillus niger TISTR 3245	1,024	256
Aspergillus flavus TISTR 3366	1,024	512
Penicillium sp. TISTR 3046	1,024	512
Cladosporium cladosporioides TISTR 3286	256	128
Chaetomium globosum TISTR 3093	128	128
Rhizopus microsporus TISTR 3301	1,024	512
Curvularia lunata TISTR 3289	256	512
Yeast		
Candida albicans TISTR 5779	1,024	512

3. วิเคราะห์หาปริมาณสารองค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหย โดยวิธีแก๊สโครมาโทรกราฟฟี่/แมสสเปคโทรเมทรี (Gas Chromatography/Mass Spectrometry; GC-MS)

จากผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยพลู และสูตรผสมน้ำมันหอมระเหย มีอัตราส่วนในการผสมคือ น้ำมันหอมระเหย พลู: กานพลู: ยูคาลิปตัส: ลาเวนเดอร์ เท่ากับ 5: 1: 2: 2 ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่า น้ำมันหอมระเหยพลู และสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน (Table 4) องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยพลู พบสารองค์ประกอบที่สำคัญจำนวน 18 ชนิด โดยสารองค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยพลู คือ ไอโซยูจีนอล มีปริมาณสารร้อยละ 47.27 รองลงมาได้แก่ 1,8-ซีนีออล, เจอมาครีน ดี และสารชาวิคอล อะซิเตท ตามลำดับ ในขณะที่สูตรผสมน้ำมันหอมระเหย พบสารองค์ประกอบที่สำคัญจำนวน 21 ชนิดสารองค์ประกอบที่พบมากที่สุดคือ 1,8-ซินีออล ร้อยละ 24.16 ลินาโลออล ร้อยละ 14.59 ไอโซยูจีนอล ร้อยละ 20.26 และยูจีนอล ร้อยละ 8.99 ตามลำดับ ซึ่ง 1,8-ซีนิออล เป็นสารองค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยยูคาลิปตัส (Maciel *et al*., 2010) สารลินาโลออล เป็นสารองค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยลาเวนเดอร์ (Danh *et al*., 2012) และสารยูจีนอล เป็นสารองค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยกานพลู (Velluti *et al*., 2003)

Table 4 Chemical composition of essential oil

Betel oil		Essential oil recipe	
Chemical composition	Peak area (%)	Chemical composition	Peak area (%)
α-Pinene	0.81	α –Pinene	0.75
Camphene	0.90	β –Myrcene	0.43
β-Myrcene	0.77	p-Cimene	1.41
1,8-Cineole	8.67	D-Limonene	2.53
(E)-ocimene	2.69	1,8-Cineole	24.16
Linalool	2.97	β -(Z)-Ocimene	0.60
Chavicol	2.76	β -(E)-Ocimene	0.57
Chavicol acetate	3.32	Linalool	14.59
Isoeugenol	47.27	Terpinene-4-ol	0.66
α –Copaene	0.97	α –Terpineol	0.53
β –Elemene	1.63	Linalyl acetate	7.42
(E)-Caryophyllene	7.45	Neryl acetate	2.36
α Humulene	1.91	Eugenol	8.99
γ- Muurolene	3.99	Isoeugenol	20.26
Germacrene D	4.03	alpha.-Copaene	0.51
(E)-Farnesene	0.98	β -Elemene	0.58
β–Bisabolene	1.08	*(E)*-Caryophyllene	7.49
Eugenol acetate	7.80	α -Humulene	1.04
		γ- Muurolene	1.72
		Germacrene D	1.80
		Eugenol acetate	1.60

สรุป

การนำน้ำหอมระเหยกานพลู ยูคาลิปตัส ลาเวนเดอร์ และทีทรี มาผสมกับน้ำมันหอมระเหยพลู เพื่อใช้ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่พบในห้องน้ำสาธารณะ พบว่า น้ำมันหอมระเหยพลูผสมสูตรมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ทุกสายพันธุ์ที่ใช้ในการทดสอบได้ดี และคัดเลือกสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่ได้คะแนนความพึงพอใจสูงสุด โดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ น้ำมันพลู: น้ำมันกานพลู: น้ำมันลาเวนเดอร์ และน้ำมันยูคาลิปตัส ในอัตราส่วน 5:1:2:2 ซึ่งมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบทั้งหมดเท่ากับ 4,096 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในสูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่มีน้ำมันหอมระเหยพลูเป็นองค์ประกอบหลัก คือ สาร 1,8 - ซินีออล,

ลินาโลออล, ไอโซยูจีนอล และยูจีนอล สูตรผสมน้ำมันหอมระเหยที่ได้จึงเหมาะสมในการนำมาใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในห้องน้ำสาธารณะต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการสนับสนุนทุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ประภัสสร รักถาวร, อุไรวรรณ ดิลกคุณานันท์ และอุดมลักษณ์ สุขอัตตะ. 2553. การศึกษาฤทธิ์ของสารสกัด และน้ำมันหอมระเหยจากใบพูลในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในห้องน้ำสาธารณะ. **วารสารสำนักการแพทย์ทางเลือก**. 2. หน้า 22-32.

วันดี กฤษณพันธ์. 2538. **สมุนไพรน่ารู้**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 257 น.

อุไรวรรณ ดิลกคุณานันท์, ยุพา มงคลสุข, งามผ่อง คงคาทิพย์, อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ, วิภารัตน์ รัตนะ และประภัสสร รักถาวร. 2547. **การออกฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ของสารสกัดพลูในประเทศไทย**. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 42. สาขาวิทยาศาสตร์. หน้า 291-297.

Alvarez-Castellanos, P. P., C. D. Bishop and M. J. P.-V. 2001. Antifungal activity of the essential oil of flowerheads of garland chrysanthemum (Chrysanthemum coronarium) against agricultural pathogens. **Phytochemistry** 57: 99-102.

Clinical and Laboratory Standards Institute. 2012. **Methods for dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically**. 9th ed. Clinical and Laboratory Standards Institute, Wayne, PA; (CLSI publication M7-A9).

Danh. L.T., N. D. A., Triet , L. T. N., Han, J. Z., R, Mammucaria, N., Fostera. 2012. Antioxidant activity, yield and chemical composition of lavender essential oil extracted by supercritical CO. **Journal of Supercritical Fluids**. 70: 27–34

Hoque M., S. Rattila, M. Asaduzzaman Shishir , M. L. Bari , Y. Inatsu, and S. Kawamoto. 2011. Antibacterial activity of ethanol extract of betel leaf (*Piper betle* L.) against some food borne pathogens. **Bangladesh Journal of Microbiology**, 28: 58-63.

Maciel, M.V., S.M. Morais, C.M.L. Bevilaqua, R.A. Silva, R.S. Barros, R.N. Sousa, L.C. Sousa, E.S. Brito, M.A. Souza-Neto.2010. Chemical composition of Eucalyptus spp. essential oils and their insecticidal effects on *Lutzomyia longipalpis*. **Veterinary Parasitology**. 167, 1–7

Mcginnis, R.M. and M.G. Rinaldi , 1996. Anfungal Drugs: **Mechanisms of action, drug resistance, susceptibility testing and assays of activity in biologic fluids In antibiotics in laboratory medicine.** 4th ed., edited by Victor Lorian, M.D. 1996. Waverly company New York.

Rahman M, I. Kuhn, M. Rahman, B. Olsson-Liljequist and R. Mollby 2004. Evaluation of a scanner-assisted colorimetric MIC method for susceptibility testing of gram-negative fermentative bacteria. **Applied and Environental Microbiology** 70: 2398–2403.

Sarrou E., C. Paschalina, K. Dimassi-Theriou and I. Therios. 2013. Volatile constituents and antioxidant activity of peel, flowers and leaf oils of *citrus aurantium* L. growing in greece. **Molecules**. 18: 10639-10.

Velluti, A., V. Sanchis, A.J. Ramos, J. Egido and S. Marin. 2003. Inhibitory effect of cinnamon, clove, lemongrass, oregano and palmarose essential oils on growth and fumonisin B1 production by *Fusarium proliferatum* in maize grain. **Food Microbiology** 89: 145-154.

การศึกษาคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระและยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวายบางชนิด

Free Radical Scavenging and Tyrosinase Inhibition Activities of *Dendrobium* Orchid Flower Extracts

เกสรี กลิ่นสุคนธ์[1] อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ[1*] ประภัสสร รักถาวร[1] และ ลลิตา คชารัตน์[1]

Ketsaree Klinsuknon[1], Udomlak Sukatta[1*], Prapasson Rukthaworn[1] and Lalita Khacharat[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP รวมทั้งศึกษาการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวาย จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ เอียสกุล ขาวสนาน บูรณเจตน์และไฟร์เบิร์ด สารสกัดเอทานอลจากดอกกล้วยไม้ทั้ง 4 ชนิด มีปริมาณผลผลิต ดังนี้ 3.047, 2.758, 3.008 และ 2.714 ตามลำดับ ศึกษาปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด พบว่าสารสกัดดอกกล้วยไม้ไฟร์เบิร์ดมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (54.17±2.48 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 1 กรัมสารสกัด) และมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH สูงที่สุด (IC_{50} เท่ากับ 194.41±9.50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) เมื่อทดสอบด้วยวิธี ABTS สารสกัดจากดอกกล้วยไม้ไฟร์เบิร์ด และ เอียสกุล มีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระ ได้ดีไม่แตกต่างกันทางสถิติ (IC_{50} เท่ากับ 7.98±0.32, 8.47±0.48 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ) ผลจากการทดสอบด้วยวิธี FRAP พบว่าสารสกัดดอกกล้วยไม้ขาวสนานมีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระได้ดีที่สุด โดยมีค่า FRAP value เท่ากับ 219.90±2.90 มิลลิโมลต่อกรัมสารสกัดและสารสกัดดอกกล้วยไม้บูรณเจตน์ และขาวสนาน มีประสิทธิภาพในการต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส IC_{50} เท่ากับ 17.36±0.11 และ 24.13±0.14 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ ดังนั้นสารสกัดจากดอกกล้วยไม้สกุลหวายจึงมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง

ABSTRACT

The main objectives of this research were to evaluate free radical scavenging and tyrosinase inhibition activities of 4 Dendrobium orchid flower extracts consist of *Dendrobium Sonia* "Earsakul", *Dendrobium* Khao Jiranand "KhaoSanan", *Dendrobium* Burana Jade and *Dendrobium* Hybrid "Fire Bird". The percentage yields of ethanol crude extract from 4 Dendrobium orchid flowers were 3.047%, 2.758%, 3.008% and 2.714%, respectively. Fire Bird orchid flower had the highest total phenolic content (54.17±2.48 mg GAE/g crude extract) and antioxidant capacity (IC_{50} value was 194.41±9.50 µg/ml). However, crude extract of Fire Bird and Earsakul orchid flowers exhibited high capacity against ABTS radical (IC_{50} values were 7.98±0.32 and 8.47±0.48 mg/ml, respectively). For the FRAP assay, the highest FRAP value (219.90±2.90 mmol/g extract) was found for crude extract of Khaosanan orchid flower. Tyrosinase inhibition activity showed that crude extracts of Burana Jade and Khaosanan orchid flower efficiently inhibited tyrosinase with IC_{50} values of 17.36±0.11and 24.13±0.14 mg/ml, respectively. This research reveals that Dendrobium orchid flower extracts have a high potential to use in cosmetic products.

Key Words: *Dendrobium*, Antioxidant, Total phenolic, DPPH assay, ABTS assay, FRAP assay and Tyrosinase

*Corresponding author; e-mail address: **aapuls@ku.ac.th**

[1]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

กล้วยไม้สกุลหวาย *Dendrobium* เป็นกล้วยไม้ที่สกุลใหญ่ที่สุด มีแหล่งกำเนิดในเขตร้อนของภูมิภาคเอเชีย และมหาสมุทรแปซิฟิกเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว จัดอยู่ในวงศ์ Orchidaceae มีลักษณะการเติบโตแบบซิมโพเดียล (sympodial) คือการเจริญทางด้านข้างเมื่อเจริญเต็มที่สามารถแตกหน่อหรือต้นใหม่ได้ (เศรษฐมันตร์, 2552)แหล่งผลิตกล้วยไม้ที่สำคัญอยู่ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ ประเทศไทย มาเลเซีย และสิงคโปร์ ซึ่งประเทศไทยเองเป็นผู้ผลิตและส่งออกกล้วยไม้ตัดดอกสกุลหวายรายใหญ่ของโลก โดยพันธุ์ที่ส่งออก คือ ปอมปาดัวร์ หรือพันธุ์หวายมาดาม ส่วนในปัจจุบันพันธุ์ที่นิยมปลูกกันมาก ได้แก่ พันธุ์บอมโจแดง บอม17 เอียสกุลขาวสนาน ขาวประวิทย์ ขาว4Nขาว5N แอนนา ซากุระ และบูรณเจตน์ (กรมวิชาการเกษตร 2551) ปัจจุบันจะเห็นการใช้ประโยชน์จากกล้วยไม้ไม่ใช่เพียงเพื่อประดับตกแต่งเพื่อความสวยงามเท่านั้น แต่ยังมีการนำส่วนต่างๆของกล้วยไม้ เช่น ลำลูกกล้วย ดอก และราก มาสกัดเป็นสารสกัดที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ซึ่งมีรายงานพบว่ากล้วยไม้สกุลหวายมีส่วนประกอบหลักเป็นพวกสารโพลีแซกคาไรด์ (polysaccharides) และสารทุติยภูมิ alkaloids, fluorenones, sesquiterpens, bibenzyls และ phenanthrens ซึ่งมีสรรพคุณทางยาอีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน และกระตุ้นภูมิคุ้มกัน (Luo*et et al*., 2011) มีการวิจัยพบว่ากล้วยไม้หวายม่วงแดง *Dendrobiumsonia* มีสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงใกล้เคียงกับวิตามินซีซึ่งเป็นสารมาตรฐาน (Shafazila*etal*., 2010)

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของสารสกัดจากดอกกล้วยไม้สกุลหวายจำนวน 4 ชนิด ที่มีประสิทธิภาพต้านการเกิดอนุมูลอิสระ และยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสที่มีผลต่อขบวนการสร้างเม็ดสีเมลานินเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่มีคุณสมบัติทั้งต่อต้านการเกิดอนุมูลอิสระ และช่วยทำยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสทำให้ผิวกระจ่างใสให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การสกัดสาร

1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

กล้วยไม้สกุลหวายชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองจากแหล่งเก็บสวนกล้วยไม้ในจังหวัดราชบุรี โดยใช้ส่วนของดอกสดทั้งดอกที่อยู่ในระยะดอกบานเต็มที่ของกล้วยไม้สกุลหวาย จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ เอียสกุล ขาวสนาน บูรณเจตน์และไฟร์เบิร์ดนำมาส่วนของดอกทั้งดอกมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ และชั่งน้ำหนักสดเพื่อเตรียมไปใช้ในขั้นตอนการสกัดเย็นต่อไป

1.2 วิธีการสกัดสารจากกล้วยไม้ตัดดอก

นำดอกกล้วยไม้สกุลหวาย ทั้ง 4 ชนิดมาทำการสกัดเย็นโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอล จำนวน 3 ซ้ำการสกัดทำโดยนำดอกกล้วยไม้สดใส่ลงในขวดลูกชมพู่ ตัวอย่างละ 150 กรัม เติมตัวทำละลายเอทานอล 1,500 มิลลิลิตร (ในอัตราส่วน 1 ต่อ 10) ลงให้ท่วมตัวอย่าง แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน แยกสารละลายที่สกัดได้มากรองด้วยกระดาษกรอง (Whatman No.4) ทำการสกัดซ้ำด้วยเอทานอลจนครบ 3 ครั้ง นำสารสกัดที่ได้จากการสกัดทั้ง 3 ครั้ง มาระเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยแบบสุญญากาศ (rotary evaporator) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจนกระทั่งตัวทำละลายที่ใช้หมดไป จะได้สารสกัดหยาบด้วยเอทานอล (ethanolic crude extract) ที่มีลักษณะข้นหนืดนำสารสกัดที่ได้มาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

ทำการวิเคราะห์โดยดัดแปลงวิธี Folin-Ciocalteu colorimetric method ตามวิธีของ Wolfe *et al*. (2003) โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐานและรายงานผลเป็นมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อสารสกัด 1 กรัม (mg GAE/1g of crude extract)

3.การตรวจสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ

3.1 การตรวจสอบคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ 2, 2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH radical scavenging activity) โดยวิธีของ Zhu *et al*. (2006) โดยเตรียมสารสกัดที่ความเข้มข้น 50-300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นำสารสารสกัดแต่ละความเข้มข้นปริมาณ 1 มิลลิลิตรและเติมสาร DPPH ที่ความเข้มข้น 0.1 โมล ปริมาณ 1 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาทีในที่มืด โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตรมิเตอร์ UV/VIS Spectrophotometer (Genesys 20,Thermo scientific, USA)คำนวณค่า % radical scavenging activity ดังสมการ

DPPH radical scavenging activity (%) = $[(A_0 - A_1)/ A_0] \times 100$

โดยที่ A_0 = ค่าการดูดกลืนแสงควบคุม

A_1 = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

นำค่า % radical scavenging activity มาสร้างกราฟเพื่อคำนวณหาค่า IC_{50}เมื่อค่า IC_{50}คือความเข้มข้นของสารสกัดที่ทำให้ค่า % radical scavenging activity ลดลงร้อยละ50 โดยใช้สาร BHT, Vitamin C และ **α**-Tocopherol เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ

3.2 การตรวจสอบคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ 2, 2'–azobis (3-ethylbenzthiazoline-6sulfonic acid) diammonium salt (ABTS radical scavenging activity) โดยวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของ Re *et al*. (1999) โดยเตรียม ABTS ความเข้มข้น 7 มิลลิโมล ผสมกับ KPS ความเข้มข้น 2.5 มิลลิโมลในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 บ่มเป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาเจือจางและวัดค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.700$\pm$0.020 และเตรียมสารสกัดที่ความเข้มข้น 1-15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร นำสารละลายของสารสกัดแต่ละชนิดจำนวน 20 ไมโครลิตร เติมสารละลาย ABTS2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 6 นาทีในที่มืด โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตรมิเตอร์คำนวณค่า% radical scavenging activity นำค่า % radical scavenging activity มาสร้างกราฟเพื่อคำนวณหาค่า IC_{50}

3.3 การตรวจสอบคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ Ferric reducing/antioxidant power (FRAP) assay โดยทดสอบตามวิธีของ Kubola and Siriamornpun (2008) ทำการเจือจางตัวอย่างสารสกัดกล้วยไม้ตัดดอกทั้ง 4 ชนิดด้วยเอทานอลร้อยละ 95 ให้มีระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร นำสารละลายของสารสกัดแต่ละชนิดจำนวน 60 ไมโครลิตรใส่ลงในหลอดทดสอบ เติมสาร FRAP reagent จำนวน 1.8 มิลลิลิตรและน้ำกลั่นจำนวน 180 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง ทิ้งไว้อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ค่าการต้านออกซิเดชันคำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทดสอบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐาน Ferrous sulfate ($FeSo_4.7H_2O$) ในช่วง 100-1000 ไมโครโมลโดยรายงานเป็น (µmol of Fe (II)/1g สารทดสอบ)

4.การตรวจสอบคุณสมบัติในการต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส

ทำการวิเคราะห์ความสามารถในการยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส (Tyrosinase inhibition activity) โดยดัดแปลงวิธีการจาก Kubo *et al*. (2000) และ Saewan *et al*. (2011) โดยเติมโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์pH 6.8 ที่ความเข้มข้น 0.1 โมล ปริมาณ 1.8 มิลลิลิตร ผสมกับสาร L-DOPA ความเข้มข้น 2.5 มิลลิโมล ปริมาณ 1 มิลลิลิตรทำการบ่มเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมสารสกัดให้มีความเข้มข้น 10-50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรจำนวน 0.1 มิลลิลิตร และ เติมเอนไซม์ไทโรซิเนส (138 ยูนิต) จำนวน 0.1 มิลลิลิตรบ่มเป็นเวลา 10 นาที วัดปฏิกิริยาโดยวัดการเกิดสาร dopachrome โดยนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร นำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่า % Tyrosinase inhibition จากสูตรคำนวณดังนี้

% Tyrosinaseinhibition = [A- (B-C)]/A * 100

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างควบคุม (ไม่เติมสารทดสอบ)

B = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทดสอบ (เติมเอนไซม์ไทโรซิเนส)

C = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทดสอบ (ไม่เติมเอนไซม์ไทโรซิเนส)

นำค่า% Tyrosinase มาสร้างกราฟเพื่อคำนวณหาค่า IC_{50}ใช้สาร BHT, Kojicactdและ Vitamin C เป็นสารมาตรฐานในการเปรียบเทียบคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ

5. การประเมินผลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การสกัดสารสกัดหยาบจากดอกกล้วยไม้สกุลหวาย

การสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวายจำนวน 4 ชนิด ได้แก่กล้วยไม้สกุลหวายเอียสกุล ขาวสนาน บูรณเจตน์ และไฟร์เบิร์ดด้วยตัวทำละลายเอทานอลโดยวิธีการสกัดเย็น พบว่า ปริมาณสารสกัดจากกล้วยไม้ตัดดอกแต่ละชนิดมีลักษณะเป็นสารเหนียวและมีสีตามสีของกล้วยไม้ตัดดอกแต่ละชนิดและปริมาณของสารสกัดหยาบที่ได้จากดอกกล้วยไม้แต่ละชนิดมีปริมาณดังนี้ สารสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวายเอียสกุลให้ปริมาณสารสกัดหยาบสูงที่สุด ร้อยละ 3.047 รองลงมาคือ บูรณเจตน์ขาวสนาน และไฟร์เบิร์ด ได้แก่ ร้อยละ 3.008, 2.758 และ 2.714 ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติดังแสดงใน Table1

2. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวายทั้ง 4 ชนิดได้แก่ กล้วยไม้สกุลหวายเอียสกุล ขาวสนาน บูรณเจตน์และ ไฟร์เบิร์ดคำนวณได้จาก linear regression equation ของกราฟสารมาตรฐานกรดแกลลิก ($y = 0.101x + 0.053$, $R^2=0.998$) พบว่า สารสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวายทั้ง 4 ชนิด มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังแสดงใน Table1 โดยสารสกัดดอก

กล้วยไม้ไฟร์เบิร์ดมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดคือ 54.17±2.48 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 1 กรัมสารสกัด รองลงมาได้แก่ เอียสกุล บูรณเจตน์ และ ขาวสนานซึ่งทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณฟีนอลิกไม่แตกต่างกันทางสถิติ อีกทั้งผลของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดยังมีความสอดคล้องกับผลการต้านอนุมูลอิสระทั้งวิธี DPPH และ ABTS โดยพบว่าสารสกัดจากดอกกล้วยไม้ไฟร์เบิร์ดมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดและมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ได้ดีที่สุดเช่นกันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวราพร และคณะ (2555) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของสารสกัดหยาบกลีบดอกกล้วยไม้หวายม่วงแดง พบว่ามีสารสกัดกล้วยไม้หวายม่วงแดงที่สกัดด้วยเอทิลอะซิเตตมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีที่สุด 90.39% และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมสูงที่สุด 863.127mg GAE/100 g crude extract

Table1 The percentage yield and total phenolic compound of ethanol extracts from *Dendrobuim* orchid flowers.

Dendrobuim orchid flowers	% Yield [ns] (g/100 g of FW)	Phenolic compounds (mgGAE/g extract)
*Dendrobium*Sonia"Earsakul"	3.047±0.38	36.95±0.93b
*Dendrobium*KhaoJiranand "KhaoSanan"	2.758±0.39	35.20+2.14b
*Dendrobium*Burana Jade	3.008±0.22	36.10±1.55b
*Dendrobium*Hybrid"Fire Bird"	2.714±0.06	54.17±2.48a

[ns]non significant($p < 0.05$)

Means ± standard deviation (SD). Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

3. การตรวจสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ DPPH, ABTS และ FRAP (DPPH ABTS and FRAPradical scavengingactivities)

การตรวจสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ การวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี DPPH assay และ ABTS assay ในการทดสอบโดยรายงานผลเป็นค่า IC_{50} หมายถึง ความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำให้ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระลดลง 50 % โดยพิจารณาจากค่าที่มีค่าน้อยจะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง

การตรวจสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของสารสกัดดอกกล้วยไม้จำนวน 4 ชนิดเอียสกุล ขาวสนาน บูรณเจตน์และไฟร์เบิร์ดมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยพบว่าสารสกัดจากไฟร์เบิร์ด (IC_{50} = 194.41 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดีที่สุดรองลงมาคือ เอียสกุลบูรณเจตน์ (IC_{50} = 269.40 c และ 271.36 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดีไม่แตกต่างกันทางสถิติ และขาวสนาน (IC_{50} = 301.58 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shafazila *et al*. (2010) ซึ่งพบว่ากล้วยหวายสีม่วงแดง *D. Sonia* ที่ความเข้มข้นมากว่า 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ได้สูงถึง 87.45% ผลจากการทดลองพบว่าสารสกัดจากดอกกล้วยไม้สกุลหวายทั้ง 4 ชนิด มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้น้อยกว่าสารมาตรฐาน **α**-Tocopherol, Vitamin C และ BHT(Table 2)

การตรวจสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ABTSจากการทดลองพบว่า สารสกัดจากดอกกล้วยไม้สกุลหวายทั้ง 4 ชนิดมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) และพบว่าประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS มีความสอดคล้องกับผลการทดลองการต้านอนุมูลอิสระ DPPH คือสารสกัดดอกกล้วยไม้ไฟร์เบิร์ดมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระABTS ได้ดีที่สุด (IC_{50} = 7.98 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)เช่นเดียวกับวิธี DPPH แต่ไฟร์เบิร์ดมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ ABTSได้ดีไม่แตกต่างกันกับสารสกัดดอกกล้วยไม้เอียสกุล (IC_{50} = 8.47 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) รองลงมาคือ ขาวสนาน และบูรณเจตน์ (IC_{50} = 10.04 และ 12.13 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) และพบว่าสารสกัดจากดอกกล้วยไม้สกุลหวายทั้ง 4 ชนิด มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS ได้ดีน้อยกว่าสารมาตรฐาน Vitamin C, BHT และ **α**-Tocopherol ดังแสดงใน Table2

การตรวจสอบคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ Ferric Reducing Ability Power(FRAP) assay เป็นการวัดความสามารถรวมในการรีดิวซ์สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก Fe^{3+}-TPTZ (Ferric tripyridyltriazine) จะถูกรีดิวซ์โดยสารที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนเหล็ก Fe^{2+} -TPTZ (Ferrous tripyridyltriazine) ซึ่งให้ผลเป็นสีน้ำเงินรายงานผลเป็นค่า FRAP value (µmol of Fe (II)/1g สารสกัด) โดยพิจารณาค่าที่ได้ยิ่งมีค่ามากแสดงว่ามีประสิทธิภาพต้านอนุมูลอิสระสูง ซึ่งพบว่าสารสกัดดอกกล้วยไม้ขาวสนานมีประสิทธิภาพต้านอนุมูลอิสระ FRAP assay ได้สูงสุด โดยมีค่า FRAP value เท่ากับ 219.90±2.90 µmol of Fe (II)/1g สารสกัด รองลง บูรณเจตน์เอียสกุล และไฟร์เบิร์ด (FRAP value = 141.75, 138.94 และ 101.20 µmol of Fe (II)/1g สารสกัดตามลำดับ) แต่สารสกัดทั้ง 4 ชนิดมีประสิทธิภาพต้านอนุมูลอิสระ FRAP value น้อยกว่าสารมาตรฐาน Vitamin C, **α**-Tocopherol และ BHTดังแสดงใน Table2

Table 2 Efficacy of *Dendrobium* orchid flower extracts to radical scavenging activities (DPPH,ABTS and FRAP assay).

Dendrobium orchid flower extracts	DPPH assay IC_{50} (µg/ml)	ABTS assay IC_{50} (mg/ml)	FRAP assay (µmol/g extract)
Dendrobium Sonia"Earsakul"	269.40±7.32b	8.47±0.48a	138.94±1.01b
Dendrobium KhaoJiranand "KhaoSanan"	301.58±3.83c	10.04±1.95b	219.90±2.90a
Dendrobium Burana Jade	271.36±1.84b	12.13±0.50b	141.75±1.16b
Dendrobium Hybrid"Fire Bird"	194.41±9.50a	7.98±0.32a	101.20±4.76c
BHT	62.34±1.98	0.45±0.78	3,532.91±34.92
Vitamin C	6.10±0.033	0.21±1.72	11,148.07±23.10
α-Tocopherol	5.67±0.039	0.54±0.58	7,453.89±15.12

Means ± standard deviation (SD). Different letters in the same column indicate significant differences ($p< 0.05$).

จากการทดสอบประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระทั้ง 3 วิธีของสารสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวายจำนวน 4 ชนิด แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากกล้วยไม้แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระได้ดีทั้ง 4 ชนิด แต่สารสกัดดอกกล้วยไม้ไฟร์เบิร์ดเป็นสารที่มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีที่สุดทั้งวิธี DPPH และ ABTS แต่สารสกัดดอกกล้วยไม้ขาวสนานมีประสิทธิภาพต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ได้ดีที่สุด เนื่องจากสารสกัดจากกล้วยไม้มีองค์ประกอบทางเคมีหลากหลายชนิด ได้แก่ สารฟีนอลิกฟลาโวนอยด์อัลคาลอยด์ และสารอื่นๆ (Lam*et et al.*, 2015) ซึ่งสารแต่ละชนิดมีกลไกการต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน และการทดสอบแต่ละวิธีมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน การ

ทดสอบการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS เป็นการทดสอบความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการดักจับอนุมูลอิสระ ในปฏิกิริยาการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สารต้านอนุมูลอิสระทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ DPPH จะได้เป็นสาร DPPH ที่เสถียร ปฏิกิริยาจะเปลี่ยนจากสารสีม่วงเป็นสีเหลือง (Amic*et et al*., 2003) เช่นเดียวกับปฏิกิริยาการต้านอนุมูลอิสระABTS ที่อนุมูลอิสระ ABTS เมื่อทำปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระจะได้สาร ABTS ที่เสถียรปฏิกิริยาจะเปลี่ยนจากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวจางลง ส่วนการวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP Assay เป็นวิธีวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอริกของสารต้านต้านอนุมูลอิสระซึ่งเป็นอีกกลไกหนึ่งในการต้านอนุมูลอิสระ

4. การตรวจสอบคุณสมบัติในการต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส

การศึกษาประสิทธิภาพในการ ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารสกัดดอกกล้วยไม้สกุลหวายทั้ง 4 ชนิด พบว่า สารสกัดดอกกล้วยไม้บูรณเจตน์มีประสิทธิภาพยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสได้ดีที่สุด มีค่า IC_{50} เท่ากับ 17.36±0.11 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร รองลงมาคือ ขาวสนาน 24.13±0.14 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ส่วน เอียสกุลและไฟร์เบิร์ดนั้นไม่ประสิทธิภาพในการต้านเอนไซม์ไทโรซิเนสได้ และเมื่อเทียบกับสารมาตรฐานทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Kojic acid, Vitamin C และ BHT พบว่าสารสกัดจากดอกกล้วยไม้บูรณเจตน์และ ขาวสนานมีประสิทธิภาพต้านเอนไซม์ไทโรซิเนสน้อยกว่าสารมาตรฐานดังกล่าว ดังแสดงผล Table3 ซึ่งสารสกัดจากกล้วยไม้ทั้งบูรณเจต และขาวสนาน มีคุณสมบัติต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไทโรซิเนสที่มีบทบาทสำคัญต่อขบวนการสร้างเม็ดสีเมลานินโดยจะเปลี่ยนสาร Tyrosine ไปเป็นสาร DOPA,DOPA quinine จนกระทั่งกลายเป็นเม็ดสีดำของ Eumelanin (พิมพร, 2544) ซึ่งสารสกัดจากกล้วยไม้มีประสิทธิภาพต้านเอนไซม์ไทโรซิเนส และไม่พบความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนังโดยผ่านการทดสอบความพิษในเซลล์เพาะเลี้ยง (Cytotoxicity) ด้วยวิธี Resazurin test เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางบำรุงผิวและช่วยเรื่องความกระจ่างใสของผิวต่อไป

Table 3 The efficacy of *Dendrobium* orchid flower extracts to anti-tyrosinase acitivity.

Dendrobium orchid flower extracts	Tyrosinase Inhibitory activity IC_{50} (mg/ml)
*Dendrobium**Sonia* "Earsakul"	ND
*Dendrobium*KhaoJiranand "KhaoSanan"	24.13±0.14
*Dendrobium*BuranaJade"Burana Jade"	17.36±0.11
Dendrobium Hybrid "Fire Bird"	ND
BHT	0.43±0.03
Kojic acid	0.16±0.02
Vitamin C	0.29±0.07

ND=notdetec

สรุป

จากการศึกษาปริมาณร้อยละผลผลิตสารสกัดหยาบของกล้วยไม้ตัดดอกสกุลหวายทั้ง 4 ชนิด ด้วยตัวทำละลายเอทานอลโดยวิธีการสกัดเย็น พบว่ากล้วยไม้สกุลหวายเอียสกุลให้ปริมาณสารสกัดหยาบสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ บูรณเจตน์ขาวสนาน และไฟร์เบิร์ด ตามลำดับ เมื่อศึกษาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและตรวจสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากดอกกล้วยไม้พบว่า สารสกัดดอกกล้วยไม้ไฟร์เบิร์ดมีปริมาณสารฟีนอลิกสูงที่สุด และสอดคล้องกับ

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ได้ดีที่สุดเช่นกันส่วนสารสกัดดอกกล้วยไม้ขาวสนานมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระวิธี FRAP ได้ดีที่สุด อีกทั้งบูรณเจตน์ และขาวสนานมีประสิทธิภาพยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสได้ดีเพื่อเป็นแนวทางนำไปพัฒนาต่อยอดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางบำรุงผิวและช่วยเรื่องความกระจ่างใสของผิวต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนทุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2551.**กล้วยไม้ตัดดอกสกุลหวาย**.กรุงเทพมหานคร. สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร

พิมพร ลีลาพรพิสิฐ. 2544. **เครื่องสำอางสำหรับผิวหนัง**.ภาควิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม คณะเภสัช-ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วรพร ศีลศร,ชัยศักดิ์ จันศรีนิยม และ มยุรี กัลยาวัฒนกุล. 2555. **การเตรียมสารสกัดมาตรฐานกล้วยไม้หวายม่วงแดงเพื่อใช้ประโยชน์ทางเครื่องสำอาง**. สำนักวิชาวิทยาศาสตร์เครื่องสำอาง. มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง.

เศรษฐมันตร์ กาญจนกุล. 2552. **กล้วยไม้ไทย**. พิมพ์ครั้งที่1. สำนักพิมพ์เศรษฐศิลป์,กรุงเทพฯ.

Amic D., D. Beslo and N. Trinajstic. 2003. Structure-radical scavenging activity relationships of flavonoids.**Croatica Chim Acta**, 76: 55–61

Kubo I., I. Kinst-Hori, S. K. Chaudhri, Y. Kubo, Y. Sanchez and T. Ogura. 2000. Flavonols from *Heterothecainuloides*: tyrosinase inhibitory activityand structural criteria. **Bioorganic&MedicinalChemistry**. 8: 1749-1755

Kubola J., and S. Siriamornpun 2008. Phenolic contents and antioxidant activities of bitter gourd (Momordicacharantia L.) leaf stem and fruit fraction extracts in vitro. **Food Chemistry**, 110: 881–890.

Luo A., Z. Ge, Z. Fan, Z. Chun and X. He. 2011. In vitro and in vivo antioxidant activity of a water-soluble polysaccharide from *Dendrobium denneanum*. **Molecules**. 16: 1579-1592.

Re R., N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang and C. Rice-Evans. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology & Medicine**. 26: 1231-1237.

Saewan N., S. Koysomboon and K. Chantrapromma. 2011. Anti-tyrosinase and Anti-cancer activities of flavonoids from *Blumeabalsamifera* DC. **JMPR**. 5(6): 1018-1025

Shafazila T. S., P. M. Lee and L. K. Hung. 2010. Radical scavenging activities of extract and solvent-solvent partition fractions from *Dendrobium* Sonia 'Red Bom' flower. pp. 762-765. In **International Conference on Science and Social Research 2010**. Malaysia.

Wolfe K., X. Wu and R. H. Liu. 2003. Antioxidant activity of apple peels. **J. Agric. Food Chem**. 51: 609-614.

Zhu K., H. Zhou and H. Qian. 2006. Antioxidant and free radical-scavenging activities of wheat germ protein hydrolysates (WGPH) prepared with alcalase. **Process Biochemistry**. 4: 1296–1302.

ผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุต่างกันต่อสมบัติการต้านจุลชีพของยูจินอล

Effect of Different Ion Charge Surfactants on Antimicrobial Properties of Eugenol

ชุดา ยุบลรัตน์[1] สุภาภรณ์ ชื่นบุญชู[1] และ **รชา เทพษร**[1*]

Chuda Yubonrat[1], Suparporn Cheunboonchoo[1] and Racha Tepsorn[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุต่างกันต่อความสามารถต้านจุลชีพของยูจินอล (Eu) ต่อ *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* โดยประเมินค่า MIC, MBC, FIC_{index} และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์ต่อหน่วยเวลา ผลการทดลองพบว่ายูจินอล และ Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB) ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.4 % w/v มีความสามารถต้านจุลชีพที่ดี ในขณะที่ Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) และ TWEEN® 80 มีความสามารถต้านจุลชีพต่ำ เมื่อใช้ Eu-CTAB มีผลเสริมประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ทดสอบได้ ในขณะที่เมื่อใช้ Eu-TWEEN® 80 พบว่าออกฤทธิ์ต้านกัน และเมื่อใช้ Eu-SDS มีผลเสริมประสิทธิภาพการยับยั้ง *S. aureus* และมีผลต้านประสิทธิภาพการยับยั้ง *E. coli* เมื่อเปรียบเทียบยูจินอลบริสุทธิ์ และ Eu-CTAB พบว่า ยูจินอลความเข้มข้น 0.5 %w/v ลดจำนวนจุลินทรีย์ทดสอบ ได้ 6.0 Log_{10} ใน 600 วินาที ในขณะที่ Eu-CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 % w/v ของยูจินอล ใช้เวลาเพียง 15 วินาที และยูจินอล-CTAB ยังแสดงสมบัติเดียวกันที่ระดับความเข้มข้น 0.4 และ 0.2 %w/v จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า CTAB สามารถส่งเสริมการต้านจุลชีพของยูจินอลได้ การใช้ Eu-CTAB จึงมีประสิทธิภาพยับยั้งจุลชีพได้ดีกว่าการใช้ยูจินอลบริสุทธิ์

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the effect of different ion charge surfactants on the antimicrobial activity of Eugenol (Eu). *E. coli* and *S. aureus* were used as test organisms. MIC, MBC, FIC_{index}, and Time Killing Analysis were determined. Results indicated the strong antimicrobial activities of Eu and Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB) at the concentration less than 0.4% w/v while Sodium Dodecyl Sulphate (SDS) and TWEEN®80 presented weak antimicrobial properties. Synergistic activity was demonstrated against both test organisms with Eu-CTAB, while Eu-TWEEN®80 showed antagonistic activity. Eu-SDS presented synergistic activity against *S. aureus* but antagonistic against *E. coli*. Eu at concentration of 0.5% w/v, 6.00 Log_{10} reductions of *E. coli* and *S. aureus* were achieved in 600 seconds, while Eu-CTAB at 0.5, 0.4 and 0.2% w/v presented the same result within 15 seconds. Finding suggests that application of CTAB could enhance antimicrobial activity of Eu. Eu-CTAB in combination demonstrated stronger inhibitory effect than Eugenol alone.

Key Words: Eugenol, Surfactant, Antimicrobial activity, Combination

*Corresponding author; e-mail address: rtepsorn@tu.ac.th

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) 12121

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology Thammasat University (Rangsit) 12121

คำนำ

ยูจินอล (Eugenol) เป็น สารองค์ประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยกานพลู (*Syzygium aromaticum* L.) (Brenes และ Roaura, 2010) ยูจินอลจัดอยู่ในชีวผลิตภัณฑ์กลุ่ม GRAS (General Recognized as Safe) ซึ่งองค์การอาหารยาแห่งสหรัฐอเมริกาอนุญาตให้ใช้ได้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เวชภัณฑ์ และเวชสำอาง (FDA, 2006) และมีรายงานยืนยันว่ายูจินอลมีประสิทธิภาพยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้หลายชนิด รวมทั้งจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคอาหารเป็นพิษ (Food Poisoning Bacteria) (Baratta และคณะ 1998, Chao และคณะ 2000; Ramadan และ Asker, 2009) อย่างไรก็ตามยูจินอลเป็นสารที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง (Hydrophobic) ส่งผลให้มีค่าการละลายน้ำ และมีเสถียรภาพในอาหารต่ำ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ดีจึงต้องใช้ในปริมาณมาก และย่อมส่งผลกระทบต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร เพื่อปรับปรุงสมบัติของยูจินอล และลดผลกระทบของปริมาณยูจินอลที่ต้องใช้ต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร การแปรสภาพยูจินอลให้อยู่ในรูปอิมัลชัน แคปซูล หรือผสมลงในวัสดุ เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติด้านการละลายน้ำ เสถียรภาพในอาหาร และเพิ่มประสิทธิภาพต้านจุลชีพของยูจินอล (Skandamis และ Nychas, 2001; Zivanovic และคณะ, 2005; Taylor และคณะ 2008; Varona และคณะ, 2010; Xiao, 2010; Xioa, 2011;)

การทำอิมัลชันอาศัยสมบัติของสารกลุ่มอิมัลซิไฟเออร์ เช่นสารลดแรงตึงผิว ซึ่งทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของของเหลว ช่วยให้การกระจายตัวของของเหลวดีขึ้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เมื่ออยู่ในน้ำจึงมักจัดตัวเป็นไมเซลล์ และทำให้หยดน้ำมันกระจายตัวในน้ำได้ สารลดแรงตึงผิวแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้ โดยพิจารณาจากลักษณะประจุในโครงสร้างโมเลกุล (ขนิษฐา, 2554) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุต่างกันต่อประสิทธิภาพการต้านจุลชีพของยูจินอล โดยประเมินดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพร่วม (Fractional Inhibition Concentration Index) ซึ่งแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารต้านจุลชีพสองชนิด ประกอบด้วย ยูจินอล และสารลดแรงตึงผิว รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งจุลชีพจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์ต่อหน่วยเวลา เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งจุลชีพของยูจินอล

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมจุลินทรีย์ทดสอบ

เตรียมโดยวิธีมาตรฐานอ้างอิงจาก Deutsche Veterinärmedizinidchr Gesellschaft (DVG, 2000) โดย *Staphylococcus aureus* DSM 799 และ *Escherichia coli* DSMZ 632 จาก Institute of Environmental and Animal Hygiene, University of Hohenheim, Germany เก็บรักษาในอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soya Agar (TSA, Difco, USA) ที่อุณหภูมิ 4°C กระตุ้น *E. coli* และ *S. aureus* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soya Broth (TSB, Difco, USA) ที่อุณหภูมิ 37°C นาน 18 ชั่วโมง เจือจางให้ได้ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10^6 CFU/mL โดยใช้สารละลาย 0.1% Peptone

การเตรียมยูจินอล สารลดแรงตึงผิว และอิมัลชั่นของยูจินอล

เก็บรักษา ยูจินอล (Eugenol;Sigma-Aldrich®, Germany), TWEEN® 80 (Ajax Fine Chem, Australia), Sodium Dodecyl Sulphate (SDS, Honghuat, Thailand) และ Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB,

Fluka®, Denmark) เก็บที่อุณหภูมิห้อง การเตรียมอิมัลชั่นของยูจินอลทำได้โดยผสมยูจินอลกับสารลดแรงตึงผิวด้วย Homogenizer (Blue line by IKA, T 25 digital, Malaysia) ที่ระดับ 17500 rpm นาน 15 นาที

การศึกษาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Minimum Inhibitory Concentration: MIC) และค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถฆ่าแบคทีเรีย (Minimum Bactericidal Concentration: MBC)

ใช้วิธีทดสอบแบบ Macro broth dilution method อ้างอิงวิธีมาตรฐานของ DVG (2000) โดยถ่ายจุลินทรีย์ทดสอบ 0.1 mL ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB ความเข้มข้น 2 เท่า ปริมาตร 2 mL เติมยูจินอล และสารลดแรงตึงผิวที่ระดับความเข้มข้น 0.001 ถึง 5.0 %w/v ปริมาตร 2 mL บ่มที่ 37°C นาน 72 ชั่วโมง ค่า MIC พิจารณาจากความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่สังเกตไม่เห็นการเจริญของจุลินทรีย์ นำหลอดทดสอบจากการประเมินค่า MIC ที่สังเกตไม่เห็นการเจริญมาทดสอบการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA บ่มที่อุณหภูมิ 37°C นาน 24 ชั่วโมง ค่า MBC คือ ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สังเกตไม่เห็นการเจริญของจุลินทรีย์บนอาหารเลี้ยงเชื้อTSA

ค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพร่วม (Fractional Inhibitory Concentration Index: FIC_{index}) ของยูจินอลร่วมกับสารลดแรงตึงผิว

ประเมินค่า FIC ด้วยวิธี Check Board Assay ร่วมกับวิธีดัดแปลงจากวิธีมาตรฐานของ DVG (2000) และคำนวณค่า FIC และ FIC_{index} ดังสมการ (Qiumin และคณะ, 2013)

$$FIC_A = \frac{\text{MIC ของ A ในสารละลายผสม}}{\text{MIC ของ A}} \quad (1)$$

$$FIC_B = \frac{\text{MIC ของ B ในสารละลายผสม}}{\text{MIC ของ B}} \quad (2)$$

$$FIC_{index} = FIC_A + FIC_B \quad (3)$$

โดยกำหนดให้ FIC $\leq$ 0.5 แสดงความพันธ์แบบเสริมฤทธิ์ระหว่างสารต้านจุลชีพสองชนิด, 0.5 < FIC $\leq$ 4 ไม่แสดงความสัมพันธ์กัน, FIC > 4 แสดงความสัมพันธ์แบบต้านฤทธิ์ระหว่างสารต้านจุลชีพสองชนิด, FIC_{index} < 1 แสดงความสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์ระหว่างสารต้านจุลชีพสองชนิด, FIC_{index} = 1 ไม่แสดงความพันธ์กันระหว่างสารต้านจุลชีพสองชนิด และ FIC_{index} > 1 แสดงความพันธ์แบบต้านฤทธิ์ระหว่างสารต้านจุลชีพสองชนิด

ศึกษาประสิทธิภาพการต้านจุลชีพของยูจินอล และยูจินอลร่วมกับสารลดแรงตึงผิวด้วยวิธีวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์ต่อหน่วยเวลา (Time Killing Analysis)

การวิเคราะห์ Time Killing Analysis ใช้วิธีดัดแปลงจาก EN 1040: Quantitative suspension test for the evaluation of basic bactericidal activity of chemical disinfectants and antiseptics (Tepsorn และคณะ, 2006) กำหนดให้ความเข้มข้นสุดท้ายของยูจินอล และยูจินอลในสารผสมยูจินอล-สารลดแรงตึงผิวเป็น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5% w/v สุ่มตัวอย่างเพื่อตรวจจำนวนจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตที่เวลา 0, 15, 30, 60, 120, 240, 420 และ 600 วินาที วิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ด้วยวิธี Spread Plate Technique บนอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA บ่มที่ 37°C นาน 24 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนี รายงานผลเป็น Log_{10} CFU/mL

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการประเมินค่า MIC และ MBC ของยูจินอล TWEEN® 80 SDS และ CTAB

จาก Figure 1A จะเห็นได้ว่า ค่า MIC ของ ยูจินอล TWEEN® 80 SDS และ CTAB ของ *E. coli* มีค่าเป็น 0.3, มากกว่า 5.0, มากกว่า 5.0 และ 0.002% w/v ตามลำดับ สำหรับ *S. aureus* เท่ากับ 0.2, มากกว่า 5.0, 0.04 และ 0.001% w/v ตามลำดับ และจาก Figure 1B จะเห็นได้ว่า ค่า MBC ของยูจินอล TWEEN® 80 SDS และ CTAB ของ *E. coli* มีค่าเป็น 0.4, มากกว่า 5.0, มากกว่า 5.0 และ 0.004% w/v ตามลำดับ สำหรับ *S. aureus* เท่ากับ 0.3, มากกว่า 5.0, 0.06 และ 0.002% w/v ตามลำดับ จากการพิจารณาค่า MIC และ MBC ของสารตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ ยูจินอล TWEEN® 80, SDS และ CTAB ที่มีผลต่อการยับยั้งการเจริญของ *E. coli* และ *S. aureus* พบว่า การใช้ CTAB ให้ค่า MIC และ MBC ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงได้ว่า สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ทั้งสองชนิดได้ดีที่สุด สำหรับ SDS ยูจินอล และ TWEEN® 80 มีประสิทธิภาพดีตามลำดับ ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Débora (2006) ได้อธิบายกลไกการยับยั้งจุลินทรีย์ของ CTAB ไว้ว่า สารลดแรงตึงผิวกลุ่มที่มีประจุบวก จะเข้าไปเปลี่ยนประจุบนผิวนอกเซลล์ ทำให้องค์ประกอบของเซลล์มีประจุเท่ากับค่า PI ทำให้เกิดการตกตะกอน ส่งผลให้เซลล์ตาย ซึ่งแตกต่างจากสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น ที่มีกลไกในการทำให้เซลล์เกิดการแตกออก ด้วยเหตุนี้ทำให้ CTAB ใช้ปริมาณน้อยกว่าสารชนิดอื่น ส่งผลให้มีค่า MIC และ MBC น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น

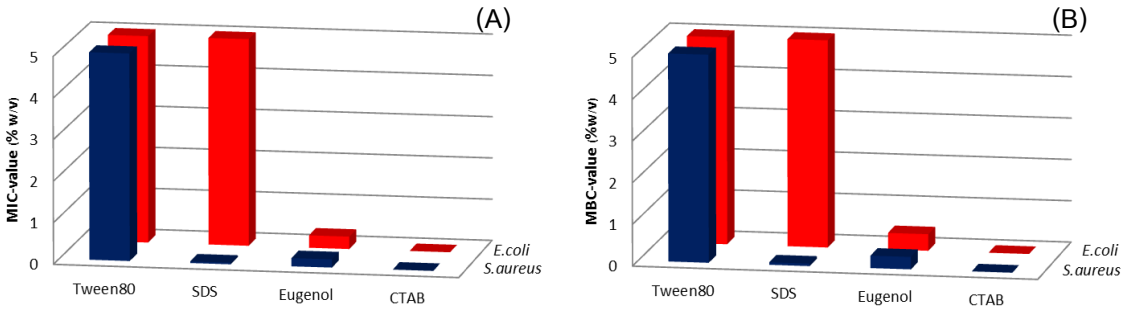


Figure 1 MIC-value (A) and MBC-value (B) of Eugenol, TWEEN 80, SDS, and CTAB

ผลการประเมินค่า $FIC_{Eugenol}$ $FIC_{Surfactant}$ และ FIC_{index}

เมื่อใช้ ยูจินอล-TWEEN® 80 พบว่า ค่า $FIC_{Eugenol}$ เป็น 2.00 ในขณะที่ $FIC_{TWEEN®80}$ เป็น 0.25 ต่อการยับยั้ง *E. coli* แสดงให้เห็นว่า TWEEN® 80 ไม่เสริมและไม่ต้านฤทธิ์ของยูจินอล ในขณะที่ยูจินอลออกฤทธิ์เสริม TWEEN® 80 เมื่อพิจารณาค่า FIC_{index} พบว่า ยูจินอล-TWEEN® 80 ออกฤทธิ์ต้านการยับยั้ง *E. coli* และให้ผลในแนวเดียวกันกับ *S. aureus* (Table 1) เมื่อใช้ยูจินอล-SDS ต่อ *E. coli* พบว่ามีค่า $FIC_{Eugenol}$ เท่ากับ 1 และ FIC_{SDS} เท่ากับ 0.25 ซึ่งให้ผลในแนวเดียวกันกับ ยูจินอล-TWEEN® 80 สำหรับ *S. aureus* พบว่ามีค่า $FIC_{Eugenol}$ และ FIC_{SDS} เท่ากับ 0.25 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กัน ในกรณีของ CTAB พบว่ามีค่า $FIC_{Eugenol}$ เท่ากับ 0.5 และ FIC_{CTAB} เท่ากับ 0.25 สำหรับจุลินทรีย์ทดสอบทั้งสอง ซึ่งแสดงปฏิสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กัน เมื่อเปรียบเทียบค่า FIC_{index} ของยูจินอล-SDS และ ยูจินอล-CTAB พบว่า ค่า FIC_{index} เป็น 1.25 และ 0.75 เมื่อใช้ *E. coli* เป็นจุลินทรีย์ทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายูจินอล-SDS มีปฏิสัมพันธ์แบบต้านฤทธิ์กัน ขณะที่การใช้ยูจินอล-CTAB แสดงปฏิสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กัน และค่า FIC_{index} เป็น 0.5 และ 0.5 ตามลำดับ เมื่อใช้ *S. aureus* เป็นจุลินทรีย์ทดสอบ แสดงได้ว่ามีปฏิสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กัน จากข้อมูลใน Table 1 แสดงให้เห็นว่า ยูจินอล-CTAB

มีฤทธิ์เสริมประสิทธิภาพยับยั้ง *E. coli* และ *S. aureus* โดยให้ผลสอดคล้องกับ Gaysinsky (2007) รายงานผลว่า เมื่อใช้ ยูจินอลร่วมกับสารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Lauroyl Arginate Ethyl ; LAE) สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ทดสอบได้ และค่า FIC_{index} จากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qiumin และคณะ (2013) ซึ่งแสดงปฏิสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กันระหว่างน้ำมันหอมระเหย และสารลดแรงตึงผิวประจุบวก

Table 1 FIC and FIC_{index} of Eugenol and Eugenol in combination with different ion charge surfactants

Combination	Test Organisms					
	E. coli			*S. aureus*		
	FIC_E	FIC_S	FIC_{index}	FIC_E	FIC_S	FIC_{index}
Eugenol-TWEEN® 80	2.00	0.25	2.25	20.00	0.33	20.33
Eugenol-SDS	1.00	0.25	1.25	0.25	0.25	0.50
Eugenol-CTAB	0.50	0.25	0.75	0.25	0.25	0.50

* FIC_E referred to FIC of Eugenol and FIC_S referred to FIC of surfactant

วิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์ต่อหน่วยเวลา (Time Killing Analysis)

จาก Table 1 ระบบอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำของยูจินอลโดยใช้ CTAB เป็นสารลดแรงตึงผิวแสดงปฏิสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กัน จึงเลือกใช้ระบบ ยูจินอล-CTAB เพื่อวิเคราะห์ Time Killing Analysis อิมัลชันของยูจินอล-CTAB มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น และมีชั้นฟองบางๆ ด้านบน และไม่พบการแยกชั้นตลอดระยะเวลาศึกษา จากผลการศึกษาพบว่า ยูจินอล-CTAB แสดงสมบัติการทำลาย *E. coli* และ *S. aureus* ได้ดีกว่า ยูจินอลบริสุทธิ์ จาก Figure 2A พบว่าที่ระดับความเข้มข้นยูจินอล บริสุทธิ์ 0.1, 0.2 และ 0.4% w/v ไม่สามารถทำลาย *E. coli* เริ่มต้น 6.00 Log_{10} CFU/mL ได้หมดภายในเวลา 600 วินาที ที่ระดับความเข้มข้น 0.5% w/v สามารถทำลาย *E. coli* ได้หมดภายใน 600 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ (Soni และคณะ, 2010) ในขณะที่เมื่อใช้ ยูจินอล-CTAB ความเข้มข้นของยูจินอล 0.2, 0.4 และ 0.5% w/v สามารถทำลาย *E. coli* ได้หมดภายใน 15 วินาที และที่ระดับความเข้มข้น 0.1% w/v สามารถทำลายได้หมดใน 420 นาที

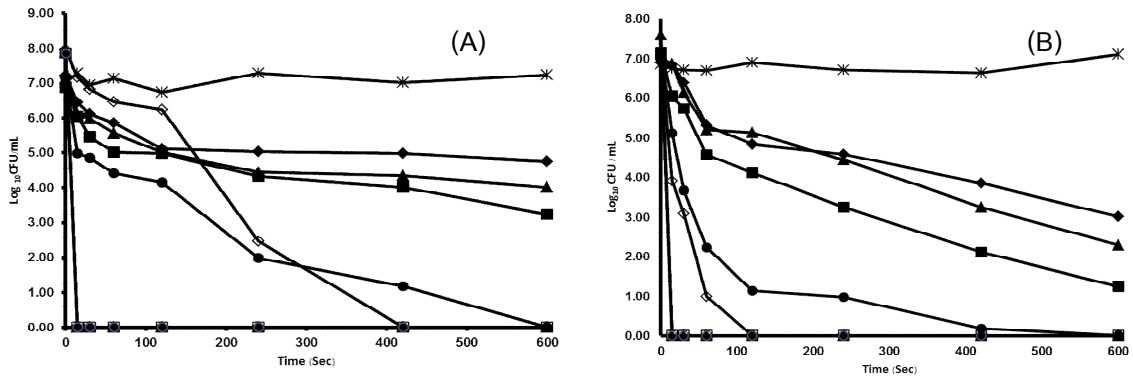


Figure 2 Antimicrobial properties of Eugenol and Eugenol-CTAB against *E. coli* (A) and *S. aureus* (B) (Eugenol 0.5% (●), 0.4% (■), 0.2% (▲), 0.1% (♦); Eugenol-CTAB 0.5% (○), 0.4% (□), 0.2% (△), 0.1% (◇); and control (∗))

ความสามารถต้านจุลชีพของยูจินอลใน TSB ต่อ *S. aureus* แสดงใน Figure 2B พบว่าประสิทธิภาพของยูจินอลต่อการทำลาย *S. aureus* เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของยูจินอล เพิ่มขึ้นนอกจากนั้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นสามารถลดปริมาณ *S. aureus* เพิ่มขึ้น ยูจินอลบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้น 0.5 %w/v ลดจำนวน *S. aureus* ได้ภายในเวลา 600 วินาที เมื่อใช้ยูจินอล-CTAB ที่ระดับความเข้มข้นของยูจินอล 0.2, 0.4 และ 0.5% w/v สามารถลด *S. aureus* ได้ 6.00 Log_{10} CFU/mL ภายใน 15 วินาที และเมื่อใช้ยูจินอล-CTAB ความเข้มข้น 0.1 %w/v ให้ผลในแนวเดียวกันภายใน 120 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับ รายงานของ (Qiumin และคณะ, 2013) ซึ่งรายงานว่าสารลดแรงตึงผิวประจุบวกจะช่วยเสริมประสิทธิภาพการต้านจุลชีพ อีกทั้งช่วยให้ยูจินอลกระจายตัวได้มากขึ้นในวัฏภาคน้ำสามารถทำให้เกิดความเข้ากันได้ (ขนิษฐา, 2554) ระหว่างส่วนประกอบที่เป็นน้ำและส่วนประกอบที่เป็นน้ำมัน

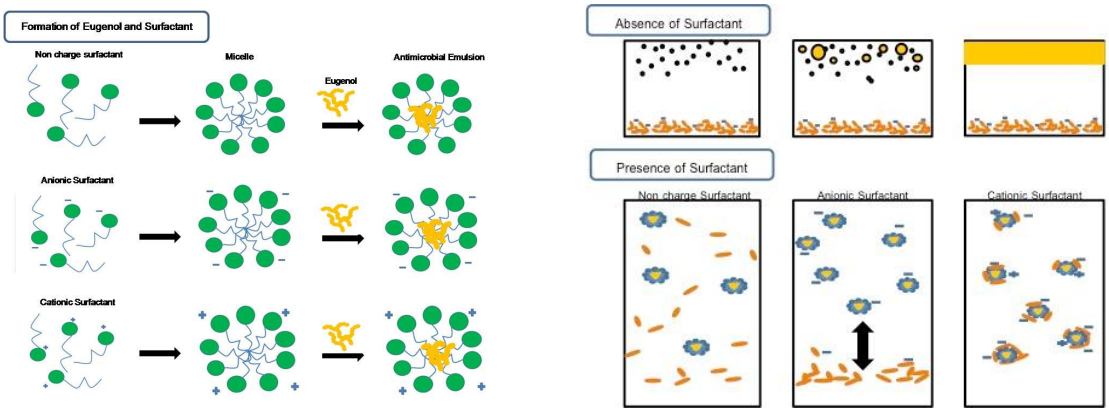


Figure 3 Schematic representation of the influence of different ion charge surfactants on phase dispersion and antimicrobial properties of Eugenol

Figure 3 แสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารลดแรงตึงผิวประจุต่างๆ ต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการละลายน้ำ และการเพิ่มขึ้นของสมบัติต้านจุลชีพของยูจินอล ซึ่งอธิบายได้ว่า สารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเรียงตัวกัน โดยหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าหากัน เรียกว่า ไมเซลล์ ยูจินอลมีความสามารถต้านจุลชีพได้ โดยยูจินอลมีผลต่อกระบวนการสร้างพลังงานของจุลินทรีย์ ซึ่งไปยับยั้งกระบวนการดูดซึมกลูโคสของเซลล์จุลินทรีย์ จึงมีผลต่อเยื่อเลือกผ่านของจุลินทรีย์ (Gill และ Holley, 2004) แต่การใช้ยูจินอลในของเหลวมีประสิทธิภาพไม่ดี เนื่องจากไม่ละลายน้ำทำให้เกิดการแยกชั้นบริเวณผิวของของเหลว แล้วเข้าไปยับยั้งจุลินทรีย์ได้ไม่ดี สารลดแรงตึงผิวร่วมกับยูจินอล ทำให้เกิดสภาพอิมัลชัน สมบัติการละลายน้ำดีขึ้นจึงทำให้เข้าใกล้จุลินทรีย์ได้มากขึ้นและมีประสิทธิภาพยับยั้งจุลินทรีย์ได้มากขึ้น ทั้งนี้การทำลายเซลล์ของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับประจุของสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์มีประจุลบ การใช้สารลดแรงตึงผิวมีประจุบวกจะมีประสิทธิภาพการต้านจุลชีพดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ และสารลดแรงตึงผิวประจุลบ เพราะเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุลบที่ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์กับประจุบวกของสารลดแรงตึงผิว ทำให้ยูจินอลและสารลดแรงตึงผิวในรูอิมัลชันเข้าไปทำลายจุลินทรีย์ได้ง่ายขึ้น

สรุปผลการทดลอง

ยูจินอลมีความสามารถต้านการเจริญของ *E. coli* และ *S. aureus* เมื่อใช้ยูจินอลร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก คือ CTAB พบปฏิสัมพันธ์แบบเสริมฤทธิ์กัน เมื่อใช้ยูจินอล-CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1% w/v ลดปริมาณ *E. coli* และ *S. aureus* ได้ 6.00 Log_{10} CFU/mL ภายใน 240 และ 120 วินาที ตามลำดับ การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า CTAB สามารถเสริมประสิทธิภาพการต้านจุลชีพของยูจินอลได้

เอกสารอ้างอิง

ขนิษฐา สมตระกูล.2554. บทบาทของสารลดแรงตึงผิวต่อการสะสมสารมลพิษในพืช. **วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี**. 1(1): 1-7

Baratta, M.T., Dorman, H.J.D., Deans, S.G., Figueiredo, A.,C., Barroso, J.G., and Ruberto, G. 1998. Antimicrobial and antiobial and antioxidant properties of some commercial essential oils. **Journal of Flavor and Fragrance** 13: 235-244.

Brenes, A., and Roura, E. 2010. Essential oils in poultry nutrition: Main effects and modes of action. **Journal of Animal Feed Science and Technology** 158: 1-14.

Chao, S.C., Young, D.G., and Young, C.J. 2000. Screening for inhibitory activity of essential oils on selected bacteria, fungi and viruses. **Journal of Essential Oil Research** 12: 639-649.

Débora B.V. and Ana M.C. 2006. Cationic lipids and surfactants as antifungal agents: mode of action. **Journal of Antimicrobial Chemotherapy** 58: 760-765.

DVG, Deutsche Verterinärmedizinische Gesellschaft e.V. 2000. **Guigelines for the Evalution of the Efficacy of Chemical Disinfectants**. (Document printed in German). Deutsche Veterinärmedizinisch Gesellschaft e.V., Frankfurter Str., 89, D-35392, Giessen, Germany

FDA. 2006. **Database of Select Committee on GRAS Substances (SCOGS) Reviews**.

Gaysinsky, S., 2007. **Emulsions and Microemulsions as Antimicrobial Delivery Systems**. Doctoral Dissertation of the Department of Food Science, University of Massachusetts in Amherst.

Gill, O.A., and Holley, A.R. 2004. Mechanisms of Bactericidal Action of Cinnamaldehyde against *Listeria monocytogenes* and of Eugenol against *L. monocytogenes* and *Lactobacillus sakei*. **Journal of Applied and Environmental Microbiology** 70: 5750-5755.

Qiumin, M.A., Davidson, P.M., and Zhong, Q. 2013. Antimicrobial properties of lauric arginate alone or in combination with essential oils in tryptic soy broth and 2% reduced fat milk. **International Journal of Food Microbiology** 166: 77-84.

Ramadan, M.F. and Asker, M.M.S. 2009. Antimicrobial and antiviral impact of novel quercetin-enriched lecithin. **Journal of Food Biochemistry** 33: 557-571

Skandamis, P.N. and Nychas, G.J.E. 2001. Effect of oregano essential oil on microbiological and physic-chemical attributes of minced meat stored in air and modified atmospheres. **Journal of Applied Microbiology** 91: 1011-1022.

Soni, K.A., Nannapanei, R., Schilling, M.W., and Jackson, V. 2010. Bactericidal activity of lauric arginate in milk and Queso Fresco cheese against *Listeria monocytogenes* cold growth. **Journal of American Dairy Science Association** 93: 4518–4525.

Taylor, T.M., Bruce, B.D., Weiss, J., and Davidson, P.M. 2008. *Listeria monocytogenes* and *Escherichaia coli* 0157:H7 inhibition in vitro by liposome-encapsulated nisin and ethylene diaminetetraacetic acid. **Journal of Food Safety** 28: 183-197

Tepsorn, R., Hunsinger, B., and Böhm, R. 2006. Antibacterial Activity of Some Traditional Thai Medicinal Plants against Foodborne Pathogens: Determination of Minimum Inhibitory Concentration and Minimum Bactericidal Concentration. The International Conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies. 12-14 December 2006. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

Varona, S., Kareth, S., Martin, A., and Cocero, M.J. 2010. Formulation of lavandin essential oil with biopololymers by PGSS for application as biocide in ecological agriculture. **Journal of Supercritical Fluids** 54: 369-377.

Xiao, D. 2010. **Novel Delivery Systems of Nisin to Enhance long-term Efficacy against Foodborne Pathogen *Listeria monocytogenes***. Doctoral Dissertation, University of Tennessee.

Xiao, D., Davidson, P.M., and Qixin, Z., 2011. Spray-Dried zein capsules with coencapsulated nisin and Thymol as antimicrobial delivery system for enhanced antilisterial properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 59:7393-404.

Zivanovic, S., Chi, S., and Draughon, A.F. 2005. Antimicrobial activity of chitosan films enriched with essential oils. **Journal of Food Science** 70: 45-51.

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักกรดอิทาโคนิกจากทะลายปาล์มน้ำมันโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

Optimization of Itaconic Acid Fermentation from Oil Palm Empty Fruit Bunch Using Response Surface Methodology

ปณิดา อู่ไทย[1] พิลาณี ไวถนอมสัตย์[2] สาวิตรี จันทรานุรักษ์[1] อันฟาล ตาเละ[2] และ อันธิกา บุญแดง[2*]

Panida U-thai[1], Pilanee Vaithanomsat[2], Sawitri Chuntranuluck[1], Anfal Talek[2] and Antika Boondaeng[2*]

บทคัดย่อ

ทะลายปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณมากในประเทศไทย และเป็นวัตถุดิบที่ประกอบด้วยลิกโนเซลลูโลสที่น่าสนใจและสามารถนำมาเพิ่มมูลค่าได้ ซึ่งทะลายปาล์มน้ำมันนั้นสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นราคาถูกในการผลิตกรดต่าง ๆ และผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มได้อีกมากมาย งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพของทะลายปาล์มน้ำมันเพื่อใช้ในการผลิตกรดอิทาโคนิก โดยกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลแยกจากการหมัก (SHF) และปรับสภาพวัตถุดิบโดยกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ และใช้เอนไซม์ Cellic CTec2 ในการย่อยวัตถุดิบเพื่อให้ได้กลูโคส และทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดอิทาโคนิกโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองจากการทดลองแบบ central composite design ของ 2 ปัจจัย 5 ระดับ ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด จากสมการควอดราติกกำลังสองและวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่าปริมาณเยื่อ และแอมโมเนียมไนเทรตที่เหมาะสมเท่ากับ 150 กรัมต่อลิตร และ 0.03 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยให้กรดอิทาโคนิกเท่ากับ 7.16 กรัมต่อลิตร

ABSTRACT

Oil palm empty fruit bunch (EFB), one of the most abundant agricultural residues in Thailand, is an attractive lignocellulosic material for value added agricultural products. They could be used as a raw material for cheap renewable feedstock to produce acids and many other value-added products. This research is to investigate the potential of EFB as a raw material for itaconic acid production through separate hydrolysis and fermentation (SHF). Steam explosion was used in this study to pretreat the lignocellulosic material. A Cellic CTec2 enzyme was used to hydrolyze the pretreated material into glucose, used as a substrate for optimizing itaconic acid production. The experimental design, central composite design (CCD) for two factors at five levels was chosen for optimizing process. The second-order quadratic model and a response surface method showed that the optimum solid loading and NH_4NO_3 for itaconic acid production were 150 g/l and 0.03 g/l, respectively, and 7.16 g/l of itaconic acid was produced.

Key Words: itaconic acid, oil palm empty fruit bunch, separate hydrolysis and fermentation (SHF)

* Corresponding author; e-mail address: **aapakb@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

[2]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Enzyme Technology and Waste Management Research Unit, Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI), Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

กรดอิทาโคนิกเป็นกรดอินทรีย์ที่มีความสำคัญมาก ทั้งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมการแพทย์ อุตสาหกรรมผลิตสี อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษพิมพ์คุณภาพดี อุตสาหกรรมผลิตกาว เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน กรดอิทาโคนิกเริ่มเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ โดยใช้เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่พลาสติก (Milson and Meers, 1985) แต่ด้วยข้อจำกัดในด้านต้นทุนการผลิตที่ยังสูงอยู่เนื่องจากการผลิตจากกระบวนการทางปิโตรเคมี ดังนั้นจึงสนใจนำทรัพยากรจากชีวมวลแทนการใช้ปิโตรเลียม และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีแหล่งชีวมวลจากภาคการเกษตรปริมาณมากจึงมีความได้เปรียบทางด้านวัตถุดิบ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในโลกที่มีศักยภาพในการผลิตปาล์มน้ำมัน โดยในบรรดาน้ำมันทั้งหมดของไทย น้ำมันปาล์มมีส่วนแบ่งในตลาดน้ำมันพืชสูงสุดเป็นอันดับสอง ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญปลูกมากในจังหวัดภาคใต้ของไทย ผลผลิตปาล์มน้ำมันที่ได้จะถูกนำเข้าสู่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อผลิตน้ำมันปาล์ม กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะทะลายเปล่าปาล์มน้ำมัน โดยวัตถุดิบที่เป็นทะลายปาล์มน้ำมันสด 100 กิโลกรัม จะได้ทะลายเปล่าปาล์มน้ำมันที่ 26-59 กิโลกรัม ดังนั้นในปีหนึ่งๆ จึงเกิดทะลายเปล่าปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมากประมาณ 2,000,000 ตันต่อปี (ธีระ และคณะ, 2548) แต่เนื่องจากทะลายปาล์มน้ำมันมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สะสมอยู่ในปริมาณมาก (วิทยา, 2543) จึงนับได้ว่าทะลายปาล์มน้ำมันเป็นแหล่งชีวมวลแหล่งใหญ่อีกแหล่งหนึ่งของประเทศไทย ดังนั้นจึงควรที่จะหาแนวทางในการสร้างมูลค่าเพิ่มจากทะลายปาล์มน้ำมันเหล่านี้ โดยการแปรรูปเป็นสารเคมี

เทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการระเบิดชีวมวล เช่น ไม้หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูง (180-210 °C) โดยไอน้ำจะไปละลายส่วนของเฮมิเซลลูโลสออกมา ทำให้เหลือเฉพาะ เซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันด้วยด่างเพื่อละลายลิกนินออกจากเซลลูโลส และนำเซลลูโลสมาย่อยด้วยเอนไซม์ให้เป็นน้ำตาลกลูโคส และใช้เป็นซับสเตรตในกระบวนการผลิตกรดอิทาโคนิก (Overend and Chornet, 1987)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบ (Raw material)

ทะลายปาล์มน้ำมันจากบริษัทสุขสมบูรณ์น้ำมันปาล์ม จำกัด อ. หนองใหญ่ จ.ชลบุรี นำมาลดขนาดให้มีขนาด และความหนาใกล้เคียงกัน และเก็บที่อุณหภูมิห้องเพื่อนำมาใช้ศึกษาต่อไป

2. การปรับสภาพ (Pretreatment)

2.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion)

นำวัตถุดิบที่เตรียมไว้บรรจุลงในเครื่องระเบิดเยื่อด้วยไอน้ำ (Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI, Kasetsart University, Thailand) โดยเติมวัตถุดิบครั้งละ 200 กรัม น้ำหนักแห้ง เข้าเครื่องระเบิดเยื่อที่พร้อมใช้งานแล้ว โดยใช้สภาวะในการระเบิดเยื่อที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปใช้สกัดด้วยน้ำขั้นต่อไป

2.2 สกัดด้วยน้ำร้อน (Water extraction)

นำเยื่อที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำ ผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนของปริมาณเยื่อต่อน้ำ 8 :1 กรัมเยื่อต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำเยื่อไปล้างด้วยน้ำประปาจนกระทั่งน้ำที่ออกมามีสีจางลงและเป็นกลาง เก็บเยื่อทะลายปาล์มน้ำมันเพื่อนำไปสกัดด้วยด่าง

2.3 การสกัดด้วยด่าง (Alkaline extraction)

เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ (w/v) อัตราส่วนของเยื่อต่อด่าง 8 :1 กรัมเยื่อต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เมื่อครบเวลานำเยื่อไปล้างด้วยน้ำประปาจนน้ำที่ออกมามีสีจางลง เก็บเยื่อทะลายปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นซับสเตรตในการผลิตกรดอิทาโคนิก

3. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดอิทาโคนิกจากทะลายปาล์มน้ำมัน

3.1 การเตรียมกล้าเชื้อจุลินทรีย์

โดยเลี้ยง *Aspergillus terreus* TISTR 3109 บนอาหารวุ้นเอียง PDA บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-7 วัน เติมน้ำกลั่นผสม Tween 80 ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ ลงในหลอดเลี้ยงเชื้อ ใช้ลวดเขี่ยสปอร์ให้กระจายในน้ำ นำสารละลายสปอร์ที่ได้ไปนับจำนวนความเข้มข้นของสปอร์ด้วย Haemacytometer ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ และเจือจางเพื่อให้ได้สปอร์ประมาณ 10^7 สปอร์ต่อมิลลิลิตร

ดูดสารละลายสปอร์ของเชื้อราที่มีสปอร์ความเข้มข้น $1x10^7$ สปอร์ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อที่มีองค์ประกอบสำหรับใช้ในการเจริญเติบโต (growth medium) ซึ่งประกอบด้วย Glucose 60 กรัมต่อลิตร, KH_2PO_4 0.88 กรัมต่อลิตร, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.95 กรัมต่อลิตร, NH_4NO_3 4 กรัมต่อลิตร และ $CuSO_4$ 0.004 กรัมต่อลิตร นำไปบ่มบนเครื่องเขย่าที่อัตราการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นแยกเซลล์เชื้อราออกมา แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วถ่ายเซลล์เชื้อราลงในอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อที่มีองค์ประกอบสำหรับการผลิตกรดอิตาโคนิค (production medium) ในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอาหารปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปบ่มบนเครื่องเขย่าที่อัตราการเขย่าเท่ากับ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

3.2 การผลิตกรดอิทาโคนิกจากทะลายปาล์มน้ำมันโดยกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลแยกจากการหมัก (separate hydrolysis and fermentation, SHF)

นำทะลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านการพรีทรีตเม้นต์ มาย่อยด้วยเอนไซม์เพื่อให้ได้กลูโคส โดยใช้เยื่อทะลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านการพรีทรีตเม้นต์ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 5 ด้วยซิเทรตบัฟเฟอร์ 0.05 M และฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เติมเอนไซม์ Cellic CTec2 25 FPU ต่อกรัมซับสเตรต นำไปบ่มบนเครื่องเขย่าที่อัตราการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนแทนกลูโคสในอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อที่มีองค์ประกอบสำหรับการผลิตกรดอิทาโคนิก

4. การวิเคราะห์

วิเคราะห์ปริมาณกรดอิทาโคนิกด้วย HPLC (Shimudzu, Japan) คอลัมน์ Aminex HPX-87H กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.005 โมลาร์ เป็นตัวชะ ที่อัตราการไหล 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

องค์ประกอบทางเคมีของทะลายปาล์มน้ำมัน

Table 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของทะลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านการพรีทรีตเม้นต์ พบว่าทะลายปาล์มน้ำมันประกอบไปด้วยเซลลูโลสร้อยละ 75.25 ลิกนินร้อยละ 7.50 และสารแทรกร้อยละ 2.11

Table 1 Chemical components of oil palm empty fruit bunch

Components	Percentage (w/w)	
	oil palm empty fruit bunch	pretreatment
Holocellulose		
-Hemicellulose	22.19 ± 0.37	2.02 ± 0.05
-Alphacellulose	65.48 ± 0.53	75.25 ± 0.21
Lignin	15.18 ± 0.70	7.50 ± 0.42
Extractive in ethanol/benzene	3.21 ± 0.04	2.11 ± 0.48

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดอิทาโคนิกจากทะลายปาล์มน้ำมัน

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตกรดอิทาโคนิกโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง อาศัยการออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) โดยปัจจัยที่ศึกษามีทั้งหมด 2 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้น (solid loading, X_1) และ (NH_4NO_3, X_2) โดยแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) ระดับสูง (+1) ระดับบวกแอลฟา (+α) และลบแอลฟา (-α) ดัง Table 3 รวมทั้งหมด 11 และทำการทดลองชุดการทดลองละ 2 ซ้ำ พบว่าในแต่ละการทดลองให้ปริมาณกรดอิทาโคนิกต่างกัน โดยชุดการทดลองที่ 11 มีปริมาณกรดอิทาโคนิก สูงที่สุดเท่ากับ 7.16 กรัมต่อลิตร รองลงมาคือชุดการทดลองที่ 9 มีปริมาณกรดอิทาโคนิกเท่ากับ 7.12 กรัมต่อลิตร ส่วนชุดการทดลองที่มีปริมาณกรดอิทาโคนิกต่ำที่สุด คือ ชุดการทดลองที่ 1 โดยมีปริมาณกรดอิทาโคนิก เท่ากับ 4.20 กรัมต่อลิตร

Table 2 Experimental design and results for enzymatic hydrolysis of oil palm empty fruit bunch to reducing sugar

Run no.	Coded values		Uncoded values		
	X1	X2	X1	X2	sugar
	Solid loading (g/L)	N (g/l)	Solid loading (g/L)	N (g/l)	(g/l)
1	-1	-1	100	0.02	36.10
2	1	-1	200	0.02	53.10
3	-1	1	100	0.04	35.15
4	1	1	200	0.04	54.55
5	1.68	0	79.93	0.03	25.63
6	-1.68	0	220.70	0.03	52.80
7	0	1.68	150	0.02	62.95
8	0	-1.68	150	0.04	62.72
9	0	0	150	0.03	62.85
10	0	0	150	0.03	63.40
11	0	0	150	0.03	62.97

Table 3 Experimental design and its independent variables and results

Run no.	Coded values		Uncoded values		Observed value	Predicted value
	X_1	X_2	X_1	X_2	(g/l)	(g/l)
1	-1	-1	100	0.02	4.2	4.21
2	1	-1	200	0.02	5.34	5.17
3	-1	1	100	0.04	5.34	4.77
4	1	1	200	0.04	4.83	4.98
5	-1.68	0	79.3	0.03	4.68	3.53
6	1.68	0	220.7	0.03	5.18	4.44
7	0	-1.68	150	0.02	4.42	3.53
8	0	1.68	150	0.04	4.94	3.76
9	0	0	150	0.03	7.12	7.06
10	0	0	150	0.03	7.09	7.06
11	0	0	150	0.03	7.16	7.06

All treatments were carried out in duplication

Table 4 Analysis of variance (ANOVA) for the quadratic model

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of square	F-value	*p*-value
Model	12.31	5	2.46	355.81	<0.0001
Residual	0.035	5	6.922E-0.03		
Total	12.35	10			

R^2 = 0.9972, Adjusted-R^2 = 0.9944

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณเพื่อประเมินผลของปัจจัยที่ศึกษาต่อการผลิตกรดอิทาโคนิก จากผลการวิเคราะห์แสดงดัง Table 5 พบว่าค่าสถิติ F เท่ากับ 355.81 ด้วย degree of freedom (df) เท่ากับ 5, 5 มีค่านัยสำคัญของการทดสอบ (*P*-value) เท่ากับ <0.0001 จึงแสดงว่าปัจจัยที่ศึกษามีผลต่อการผลิตกรดอิทาโคนิกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

Table 5 Results of the regression analysis for itaconic acid yield

Variables	Coefficient estimate	Standard error	*F*-value	*P*-value
(Constant)	7.12	0.048	355.81	< 0.0001
X_1	0.17	0.029	32.29	0.0033
X_2	0.17	0.029	33.67	0.285
X_1X_2	-0.41	0.042	98.33	0.0434
X_1^2	-1.07	0.035	927.11	< 0.0001
X_2^2	-1.19	0.035	1157.27	< 0.0001

เมื่อวิเคราะห์สมการถดถอย พบว่าปัจจัยทั้ง 2 และค่าตอบสนองมีความสัมพันธ์กัน โดยสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยดัง Table 5 แสดงทิศทางของปัจจัยทั้ง 2 และปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกรดอิทาโคนิก พบว่า สัมประสิทธิ์เส้นตรงของกำลังสองทั้ง 2 ปัจจัย มีผลต่อการผลิตกรดอิทาโคนิก อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ค่า R^2 เท่ากับ 0.9972 แสดงว่าสมการดังกล่าวสามารถอธิบายตัวแปรในค่าตอบสนองได้ 99.72 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสามารถสรุปสร้างสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 2 และผลของการผลิตกรดอิทาโคนิก ได้ดังนี้

$$Y= 7.12+0.17X_1+0.17X_2-0.41X_1X_2-1.07X_1^2-1.19X_2^2 \quad (1)$$

โดย Y คือ การผลิตกรดอิทาโคนิก

X_1 คือ ปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร)

X_2 คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนเทรต (กรัมต่อลิตร)

จากสมการที่ 1 สรุปได้ว่าตัวแปรอิสระ X_1 และ X_2 มีอิทธิพลทางบวก (มีสัมประสิทธิ์เป็นบวก) ต่อค่าการตอบสนอง (Y) กล่าวคือ หากเพิ่มปริมาณของเยื่อเซลลูโลสและแอมโมเนียมไนเทรต จะทำให้การผลิตกรดอิทาโคนิกเพิ่มขึ้นได้ การผลิตกรดอิทาโคนิกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

แผนภาพพื้นที่ผิวตอบสนองสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย ที่ส่งผลต่อการผลิต

ดังนั้น Figure 1 จึงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร) และความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนเทรต (กรัมต่อลิตร) ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ 0.01 ถึง 0.05 กรัมต่อลิตร ต่อการผลิตกรดอิทาโคนิก แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนเทรตจาก 0.02 ถึง 0.03 กรัมต่อลิตร มีผลให้การผลิตกรดอิทาโคนิก เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนเทรตจนกระทั่งมากกว่า 0.03 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้การผลิตกรดอิทาโคนิกลดลง ในลักษณะทำนองเดียวกันกับปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้น เมื่อเพิ่มปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้นตั้งแต่ 100-160 กรัมต่อลิตร มีผลให้การผลิตกรดอิทาโคนิกเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้นมากกว่า 160 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้การผลิตกรดอิทาโคนิกลดลง

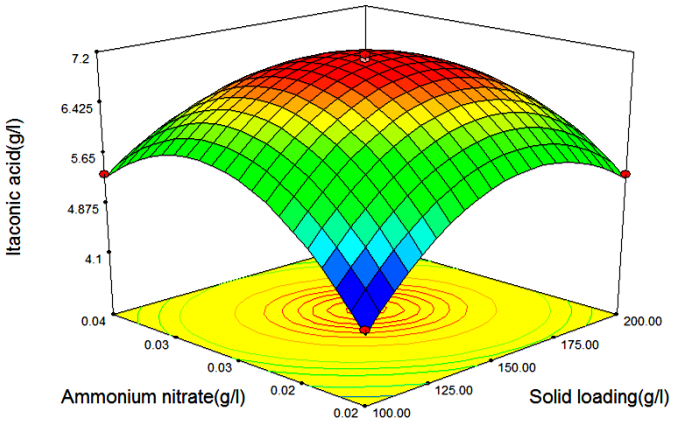


Figure 1 The response of itaconic acid (g/l) as a function of solid loading (g/l) and NH_4NO_3 (g/l) based on central composite experimental results.

สรุป

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตกรดอิทาโคนิกจากทะลายปาล์มน้ำมัน โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ CCD และวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตกรดอิทาโคนิก ได้แก่ ปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้น 150 กรัมต่อลิตร และ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมไนเทรต 0.03 กรัมต่อลิตร ให้ค่าปริมาณกรดอิทาโคนิกเท่ากับ 7.16 กรัมต่อลิตร โดยมีค่าคาดหวังจากการทำนายเท่ากับ 7.06 กรัมต่อลิตร

จากผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าทะลายปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบที่เหมาะเพื่อใช้นำมาผลิตกรดอิทาโคนิก เมื่อผ่านกระบวนการพรีทรีตเม้นต์ที่เหมาะสมแล้ว เนื่องจากมีเซลลูโลสอยู่ในปริมาณสูง และมีลิกนิกอยู่ในปริมาณต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (สวก.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนการวิจัยตลอดโครงการวิจัยในปีงบประมาน 2557-2558

เอกสารอ้างอิง

วิทยา ปั้นสุวรรณ. 2543. **เรื่องเฉพาะทางเคมี (เคมีไม้และการใช้ประโยชน์)**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธีระ เอกสมทราเมษฐ์, ชัยรัตน์ นิลนนท์, ธีระพงศ์ จันทรนิยม, ประกิจ ทองคำ และสมเกียรติ สีสนอง. 2548. **เส้นทางสู่ความสำเร็จการผลิตปาล์มน้ำมัน**. ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตปาล์มน้ำมัน. คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Milson, P.E. and J.L. Meers. 1985. Gluconic acid itaconic acid. **Comprehensive biotechnol**. 3: 681-700.

Overend, R.P., E. Chornet. and J.A. Gascoigne. 1987. Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments. **Phil. Trans. Roy. Soc. Lond**. A. 321: 523-536.

ผลของไมโครเวฟต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์ข้าวแคบกึ่งสำเร็จรูป

An Effect of microwave on crispy and salty rice cracker (Kao-kab) product

บุษบา มะโนแสน[1*] จิรรัชต์ กันทะขู้[1] จริยา มามาตร[1] และ พรพรรณ ธิตา[1]

Busaba Manosan[1*], Jirarat Kantakhoo[1], Jariya Mamart[1] and Pornphan Thita[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาผลิตภัณฑ์ข้าวแคบกึ่งสำเร็จรูปที่สามารถพองตัวด้วยเตาไมโครเวฟ มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้สะดวกต่อการบริโภค งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกศึกษาระยะเวลาการทำแห้งแผ่นข้าวแคบดิบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่าใช้เวลา 40 นาที ความชื้นผลิตภัณฑ์ลดเหลือ ร้อยละ 6.19 เมื่อระยะเวลาการทำแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้ความชื้นในแผ่นข้าวแคบลดลง ซึ่งมีผลให้การพองตัวมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน การศึกษาส่วนที่สอง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวแคบเมื่อให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟที่กำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นระยะเวลา 1-4 นาที พบว่าข้าวแคบมีการพองเต็มที่เมื่อให้ความร้อนนาน 2 นาที ขึ้นไป อัตราการพองตัวของข้าวแคบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้ความร้อน ข้าวแคบมีการพองตัว 1.56, 2.55, 3.54 และ 4.12 เท่า ของปริมาตรเริ่มต้น เมื่อให้ความร้อน 1, 2, 3 และ 4 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ความแข็งกลับมีค่าลดลงเมื่ออัตราการพองตัวเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการให้ความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี L*a*b* โดยเมื่อเวลาการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสว่าง (L*) และค่าสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อให้ความร้อนตั้งแต่ 2 นาที ขึ้นไป ดังนั้น การให้ความร้อนผลิตภัณฑ์ข้าวแคบกึ่งสำเร็จรูปด้วยเตาไมโครเวฟที่กำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นเวลา 2-4 นาที จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่เหมาะสมต่อการบริโภค

ABSTRACT

The study of instant crispy and salty rice cracker (Kao-kab) product for microwave oven was aimed to increase convenience consumption. This study was consisted of 2 parts . The optimum of drying time for the 8 centimeters diameter cracker was at 40 minutes in 35°C hot air oven that reduced their moisture contents to 6.19%. As the drying time increased, moisture contents and puffing degree trended to decline. The qualities of cracker applied of microwave power from 1 to 4 minutes shared that cracker expansion perfectly took at least 2 minutes The cracker expansion volume ratios were 1.56, 2.55, 3.54 and 4.12 times of the original volume when heating for 1, 2, 3 and 4 minutes, respectively. While the expansion ratios increased, Hardness tend to decline. The brightness (L*) and redness (a*) slightly increased, when heating time increased. Whereas, the yellowness (b*) raised significantly after 2 minutes of heating time. Kao-kab had suitable edible qualities when using microwave power at 800 watts for 2-4 minutes.

Key Words: rice cracker, microwave, expansion

* Corresponding author; e-mail address: **busaba_kai@hotmail.com**

[1]สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาน่าน จ. น่าน 55000

[1]Agro-Industry Department, Faculty of Science and Agricultural and Technology, RMUTL Nan, Nan 55000

คำนำ

ข้าวแคบเป็นอาหารว่างชนิดหนึ่งมีลักษณะคล้ายข้าวเกรียบ รสชาติเค็มเล็กน้อย ทำจากแป้งข้าวเหนียวงาดำ และเกลือ มีวิธีทำคล้ายข้าวเกรียบปากหม้อ แต่การทำข้าวแคบ เป็นการนำเอาแผ่นแป้งไปตากแดดให้แห้ง ทำให้สุกโดยปิ้งหรือทอด นิยมเก็บไว้รับประทานในงานเทศกาลสำคัญ เช่น ปีใหม่เมือง งานบวชลูกแก้ว งานปอยหลวง ปัจจุบันยังนิยมรับประทานกันอยู่ มีขายทั่วไปในท้องตลาดในภาคเหนือตอนบน (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550) สภาพตลาดอาหารของโลกมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องมาจากผู้บริโภคมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคที่มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างประชากรและวิธีการดำเนินชีวิตประจำวันที่เร่งรีบส่งผลให้ผู้บริโภคส่วนใหญ่หันมาบริโภคอาหารกึ่งสำเร็จรูป (Instant foods) อาหารพร้อมปรุง (ready-to-cook) และอาหารพร้อมรับประทาน (ready-to-eat) มากขึ้น สอดคล้องกับความนิยมใช้เตาไมโครเวฟอุ่นหรือเตรียมอาหารเพื่อบริโภคเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากช่วยเพิ่มความสะดวกสบาย สามารถทำอาหารให้ร้อนในระยะเวลาอันสั้น และไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพผู้บริโภค เพราะคลื่นไมโครเวฟไม่สะสมในอาหาร ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวแคบกึ่งสำเร็จรูปสำหรับเตาไมโครเวฟ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการบริโภคเนื่องจากใช้เวลาสั้นในการเตรียม นอกจากจะทำให้ผู้บริโภคสามารถรับประทานข้าวแคบได้สะดวกขึ้นแล้ว ยังเป็นการช่วยอนุรักษ์ภูมิปัญญาท้องถิ่นไม่ให้สูญหายอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากระบวนการทำข้าวแคบ ผลของระยะเวลาในการอบแห้ง และผลการให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟต่ออัตราการพองตัว และการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ บางประการของผลิตภัณฑ์ข้าวแคบเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวแคบพร้อมบริโภคโดยการใช้ไมโครเวฟให้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การทำแผ่นข้าวแคบ

ผสมแป้งข้าวเหนียว 1 กิโลกรัม เกลือป่น ½ ช้อนชา และน้ำ 1 กิโลกรัม ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ตักน้ำแป้งปริมาณ 50 กรัม ลงบนผ้าลินินที่ขึงบนปากหม้อ ที่อุณหภูมิน้ำเดือด เกลี่ยให้เป็นแผ่นบาง เมื่อแป้งสุกจะมีลักษณะใส จึงใช้พิมพ์สแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ตัดแผ่นแป้ง นำแผ่นแป้งที่ได้วางบนตะแกรง แล้วอบด้วยตู้อบลมร้อน (WTB Binder, IP 20) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (อ้างอิงจาก อุณหภูมิเฉลี่ยช่วง 9.00-16.00 น. เดือนสิงหาคมถึงกันยายน พ.ศ. 2557)

การศึกษาอัตราการทำแห้งแผ่นข้าวแคบ

นำแผ่นข้าวแคบไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-90 นาที นำตัวอย่างข้าวแคบที่อบแห้งที่ระยะเวลาต่างๆ มาวิเคราะห์ความชื้นตามวิธีของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2005) โดยการชั่งตัวอย่าง 2 กรัม ใส่ในถ้วยอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น และนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ทดลอง 4 ซ้ำ แล้วจึงนำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับระยะเวลาการอบแห้ง นำตัวอย่างข้าวแคบอีกส่วนวิเคราะห์อัตราการพองตัว โดยนำข้าวแคบไปให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ (Imarflex, MO-7528VA) ปรับระดับความร้อนบนแผงควบคุมไปที่ 800 วัตต์ นาน 2 นาที วิเคราะห์อัตราการพองตัว โดยเทียบปริมาตรของแผ่นข้าวแคบก่อนและหลังการให้ความร้อน วัดปริมาตรโดยใช้หลักการแทนที่ด้วยเมล็ดงา (คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, 2539) จากการทดลอง

จะทำให้ทราบระยะเวลาการทำแห้งแผ่นข้าวแคบที่สามารถลดความชื้นผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่กำหนด คือ ไม่เกินร้อยละ 12 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2549) และทราบผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่ออัตราการพองตัวของแผ่นข้าวแคบ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวแคบเมื่อให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

นำแผ่นข้าวแคบที่ผ่านการอบแห้งตามระยะเวลาที่ได้ศึกษาเบื้องต้น ที่ทำให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 มาให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟที่กำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นระยะเวลา 1-4 นาที แล้ววิเคราะห์คุณภาพดังนี้

ระดับของการพองตัว (ร้อยละ) โดยประเมินจากลักษณะปรากฏที่กำหนดเกณฑ์การให้คะแนนระดับการสุกพองจาก 0-100 (ไม่พบการพองตัว จนถึงพองตัวเต็มที่) ทดลอง 3 ซ้ำ โดยประเมินดังต่อไปนี้

ร้อยละ 0 : แผ่นแป้งดิบทั้งแผ่น มีลักษณะใส ไม่มีการพองตัว

ร้อยละ 10 : มีการพองตัวจากขอบด้านข้างเข้ามายังจุดกึ่งกลางที่ระยะ 0.0-0.8 ซ.ม. หรือร้อยละ 10 ของ พื้นที่ แป้งส่วนนี้มีสีขาว ส่วนที่ถัดเข้ามายังเป็นแป้งดิบ มีลักษณะใส

ร้อยละ 20 : มีการพองตัวจากขอบด้านข้างเข้ามายังจุดกึ่งกลางที่ระยะ 0.0-1.6 ซ.ม. หรือร้อยละ 20 ของพื้นที่ ส่วนที่ถัดเข้ามายังเป็นแป้งดิบ มีลักษณะใส

ร้อยละ 30 : มีการพองตัวจากขอบด้านข้างเข้ามายังจุดกึ่งกลางที่ระยะ 0.0-2.4 ซ.ม. หรือร้อยละ 30 ของพื้นที่ ส่วนที่ถัดเข้ามายังเป็นแป้งดิบ มีลักษณะใส

ร้อยละ 40 : มีการพองตัวจากขอบด้านข้างเข้ามายังจุดกึ่งกลางที่ระยะ 0.0-3.2 ซ.ม. หรือร้อยละ 40 ของพื้นที่ ส่วนที่ถัดเข้ามายังเป็นแป้งดิบ มีลักษณะใส

ร้อยละ 50 : มีการพองตัวจากขอบด้านข้างเข้ามายังจุดกึ่งกลางที่ระยะ 0.0-4.0 ซ.ม. หรือร้อยละ 50 ของพื้นที่ ส่วนที่ถัดเข้ามายังเป็นแป้งดิบ มีลักษณะใส

ร้อยละ 60 : มีการพองตัวจากขอบด้านข้างเข้ามายังจุดกึ่งกลางที่ระยะ 0.0-4.8 ซ.ม. หรือร้อยละ 60 ของพื้นที่ ส่วนที่ถัดเข้ามายังเป็นแป้งดิบ มีลักษณะใส

ร้อยละ 70 : มีการพองตัวจากขอบด้านข้างเข้ามายังจุดกึ่งกลางที่ระยะ 0.0-5.6 ซ.ม. หรือร้อยละ 70 ของพื้นที่ ส่วนที่ถัดเข้ามายังเป็นแป้งดิบ มีลักษณะใส

ร้อยละ 80 : มีการพองตัวจากขอบด้านข้างเข้ามายังจุดกึ่งกลางที่ระยะ 0.0-6.4 ซ.ม. หรือร้อยละ 80 ของพื้นที่ ส่วนที่ถัดเข้ามายังเป็นแป้งดิบ มีลักษณะใส

ร้อยละ 90 : มีการพองตัวจากขอบด้านข้างเข้ามายังจุดกึ่งกลางที่ระยะ 0.0-7.2 ซ.ม. หรือร้อยละ 90 ของพื้นที่ส่วนที่ถัดเข้ามายังเป็นแป้งดิบ มีลักษณะใส

ร้อยละ 100 : มีการพองตัวทั่วทั้งแผ่น และมีสีขาว

- อัตราการพองตัว โดยเทียบปริมาตรของแผ่นข้าวแคบก่อนและหลังการให้ความร้อน วัดปริมาตรโดยใช้หลักการแทนที่ด้วยเมล็ดงา ทดลอง 3 ซ้ำ

- เนื้อสัมผัส วัดเนื้อสัมผัสตรงจุดกึ่งกลางของแผ่นข้าวแคบโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Brookfield, CT3) วัดค่าแรงกดแตกหรือค่าความแข็ง (hardness) ด้วยหัววัด (probe) แบบ Sphere ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 1.0 มิลลิเมตร/วินาที ทดลอง 10 ซ้ำ

- ค่าสี L*a*b* วัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี (Minolta, CR-10) ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นข้าวแคบ ทดลอง 10 ซ้ำ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

อัตราการทำแห้งแผ่นข้าวแคบ

ในการอบแห้งแผ่นข้าวแคบที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (Figure 1) พบว่าปริมาณความชื้นของข้าวแคบลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 40 นาทีแรกของการอบแห้ง (จากเริ่มต้นร้อยละ 23.72 ลดลงเหลือร้อยละ 6.19) การเปลี่ยนแปลงแบ่งเป็น 2 ระยะได้แก่ ช่วง 0 - 40 นาที เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ข้าวแคบค่อนข้างสูง เนื่องจากน้ำในผลิตภัณฑ์ถูกทำให้ระเหยออกไปอย่างรวดเร็วตามกลไกการทำแห้ง สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าเป็นช่วงที่น้ำในอาหารเคลื่อนที่จากด้านในสู่ด้านนอกบริเวณผิวหน้าในอัตราที่เท่ากับน้ำที่ระเหยที่ระเหยออกจากผิวหน้า เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอระเหย และถูกพัดพาไปด้วยลมร้อน (วิไล, 2546) และช่วง 40 นาทีเป็นต้นไปเป็นช่วงที่ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงในระดับต่ำ เนื่องจากผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้งอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในอาหารมายังผิวหน้าจึงต่ำกว่าอัตราการระเหยของน้ำไปยังอากาศโดยรอบ (วิไล, 2546)

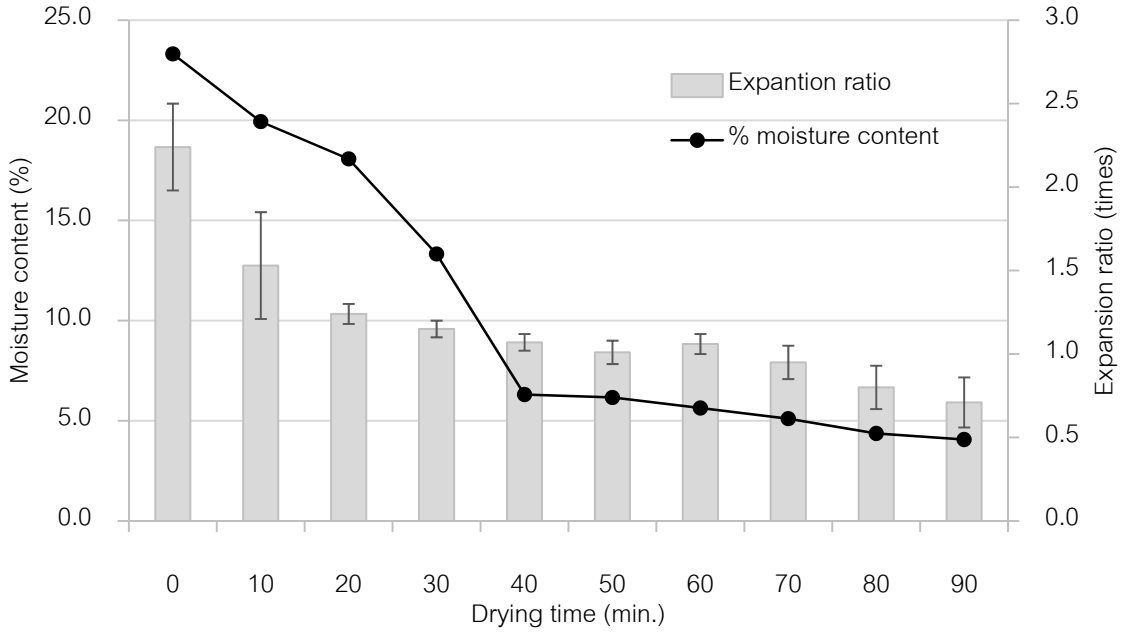


Figure 1 Changing of moisture contents and expansion ratios of Kao-cab during drying

ผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อการพองตัวของข้าวแคบ

การอบแห้งมีผลทำให้ความชื้นของข้าวแคบลดลงตามระยะเวลาการอบที่เพิ่มขึ้น ความชื้นที่ลดลงมีผลโดยตรงต่ออัตราการพองตัวของข้าวแคบที่มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน (Figure 1) ในช่วง 0-40 นาที แรกของการอบแห้ง อัตราการพองตัวของข้าวแคบมีค่าลดลงเช่นเดียวกับกับความชื้นที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และภายหลัง 40 นาที ปริมาณความชื้นของข้าวแคบลดลงในอัตราที่ช้าลง การพองตัวของข้าวแคบก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ มีพองตัวลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นจนระดับความชื้นเริ่มลดลงเรื่อยๆ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นเหลืออยู่น้อย เมื่อให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ความชื้นที่เหลืออยู่เมื่อสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟจะเกิดการสั่นสะเทือนเสียดสีกันเป็นความร้อน ส่งผลให้เกิดไอน้ำได้เพียงเล็กน้อย จึงไม่สามารถดันโครงสร้างของเจลแป้งให้เกิดการขยายตัวและพองตัวอย่างเต็มที่ (พันธิพา และคณะ, 2532; วิไล, 2546) ดังนี้ความชื้นที่ลดลงของข้าวแคบมีผลให้การพองตัวลดลง

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวแคบเมื่อให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การนำข้าวแคบที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส 40 นาที มาให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟที่ระดับกำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 นาที พบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดังต่อไปนี้

การพองตัว

จากการประเมินลักษณะปรากฏ ที่มีการกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนระดับการสุกพองจาก 0-100 (ไม่พบการพองตัว-พองตัวเต็มที่) พบว่าข้าวแคบที่ผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลา 1 นาที มีการพองตัวเพียงร้อยละ 70 ของพื้นที่ทั้งหมดของแผ่น ส่วนที่ไม่พองตัว มีลักษณะใส ส่วนที่พองตัวมีสีขาว ข้าวแคบพองตัวเต็มที่ (ร้อยละ 100) เมื่อให้ความร้อนนาน 2, 3, และ 4 นาที สอดคล้องกับอัตราการพองตัวที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้ความร้อน ข้าวแคบมีการพองตัว 1.56, 2.55, 3.54 และ 4.12 เท่า ของปริมาตรเริ่มต้น เมื่อให้ความร้อน 1, 2, 3 และ 4 นาที ตามลำดับ (table 1)

Table 1 Expansion levels, Appearance attributes, and expansion ratios of Kao-kab after microwave heating for 0, 1, 2, 3 and 4 minutes

Heating time (min.)	Expansion level (%)	Appearance attributes	Expansion ratio (times)
0	0	Rare , transparent	0.29^{e}±0.16
1	70	Rare, almost white and slightly transparent	1.56^{d}±0.24
2	100	Well done, white	2.55^{c}±0.43
3	100	Well done, creamy white	3.54^{b}±0.25
4	100	Well done, creamy brown	4.12^{a}±0.25

$^{a,b,c,\ldots,e}$ Mean value in the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

เนื้อสัมผัส

การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของข้าวแคบเมื่อให้ความร้อนที่ระยะเวลาต่างกัน (table 2) พบว่าเมื่อระยะเวลาการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ความแข็งของข้าวแคบมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับระดับการพองและอัตราการพองตัวของข้าวแคบ (table 1) โดยที่ระยะเวลาการให้ความร้อนที่ 0 และ 1 นาที ข้าวแคบยังดิบอยู่ ความแข็งจึงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อให้ความร้อน 2 นาที ข้าวแคบมีการพองตัวเต็มที่ ค่าความแข็งจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนที่ 3 และ 4 นาที อัตราการพองตัวยิ่งเพิ่มขึ้น ความแข็งของข้าวแคบจึงมีค่าลดลง

Table 2 Hardness of Kao-kab after microwave heating for 0, 1, 2, 3 and 4 minutes

Heating time (min.)	Hardness (g)
0	$1446.60^{a} \pm 141.23$
1	$1343.60^{a} \pm 161.07$
2	$1110.30^{b} \pm 110.43$
3	$763.50^{c} \pm 158.77$
4	$820.00^{c} \pm 153.92$

^{a,b} Mean value in the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

ค่าสี L* a* b*

การเปลี่ยนแปลงค่าสี L* a* b* ของข้าวแคบเมื่อให้ความร้อน (Table 2) พบว่า ค่าความสว่าง (L*) และค่าสีแดง (a*) ของข้าวแคบ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ค่าสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อให้ความร้อนตั้งแต่ 2 นาที ขึ้นไป ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะปรากฏของข้าวแคบ (Table 1) เมื่อให้ความร้อนนาน 2 นาที ข้าวแคบมีการพองตัวเต็มที่ทั้งแผ่น มีสีขาว มีสีขาวครีมเมื่อให้ความร้อนนาน 3 นาที และที่ระยะเวลา 4 นาที ข้าวแคบเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน การเกิดสีน้ำตาล อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) หรือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลของน้ำตาลรีดิวซ์กับหมู่เอมีนในโมเลกุลของโปรตีน เกิดเป็นสารไกลโคซีล (N-substituted glycosylamine) และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล โดยความร้อนเป็นปัจจัยที่เร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (นิธิยา, 2549)

Table 3 Color value (L* a* b*) of Kao-kab after microwave heating for 0, 1, 2, 3 and 4 minutes

Heating time	Color value		
(min.)	L* ^{ns}	a* ^{ns}	b*
0	40.78±1.68	6.41±1.17	6.11^{b}±2.68
1	44.07±1.92	6.78±1.39	7.40^{b}±2.27
2	44.10±1.67	6.68±0.95	13.14^{a}±2.67
3	43.53±0.76	6.57±1.11	12.70^{a}±1.25
4	44.70±1.21	7.00±0.92	12.20^{a}±1.27

^{ns} Means are not significantly different ($p>0.05$)

^{a,b} Mean value in the same column with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

สรุป

การทำแห้งแผ่นข้าวแคบดิบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เพื่อให้เหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 12 ใช้ระยะเวลา 40 นาที ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีความชื้นร้อยละ 6.19 เมื่อระยะเวลาการทำแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้ความชื้นในแผ่นข้าวแคบลดลง ซึ่งมีผลให้การพองตัวมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน การให้ความร้อนแก่ข้าวแคบด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นระยะเวลา 2 นาที ขึ้นไป มีผลทำให้ข้าวแคบพองเต็มที่ทั่วแผ่น ข้าวแคบมีการพองตัว 1.56, 2.55, 3.54 และ 4.12 เท่า ของปริมาตรเริ่มต้น เมื่อให้ความร้อน 1, 2, 3 และ 4 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ค่าของความแข็งกลับมีค่าลดลงเมื่องอัตราความพองตัวเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสว่าง (L*) และค่าสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อให้ความร้อนตั้งแต่ 2 นาทีขึ้นไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัย ขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายสนับสนุนทุกท่านที่ช่วยประสานงานและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ขอบคุณนักศึกษา อาจารย์ และเจ้าหน้าที่สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

คณาจารย์ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์. 2539. **คู่มือปฏิบัติการการวัดค่าคุณภาพผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิธิยา รัตนาปนนท์. 2549. **เคมีอาหาร**. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

พันธิพา จันทวัฒน์, ณรงค์ นิยมวิทย์ และธเนศ แก้วกำเนิด. 2532. ผลของความชื้นการกระจายความชื้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการทอดที่มีผลต่อคุณภาพของแคบหมู. **อาหาร** 19(2): 79-88

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2550. **อาหารพื้นบ้านล้านนา : ข้าวแคบ**. แหล่งที่มา: http://library.cmu.ac.th/ntic/lannafood/detail_lannafood.php?id_food=102, 17 พฤษภาคม 2557.

วิไล รังสาดทอง. 2546. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2549. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 1328/2549 ข้าวแคบ**. แหล่งที่มา: http://app.tisi.go.th/otop/pdf_file/tcps1328_49.pdf, 25 มีนาคม 2557.

AOAC. 2005. **Official Methods of Analysis**. 18th Ed, The Association of Official Analysis of Chemists, Gaithersburg, MD.

ผลของความชื้นต่อคุณสมบัติการคั่วแตกของข้าวฟ่าง

Effect of Moisture Content on Popping Properties of Sorghum

นพวรรณ นุ่มศิริ[1] ธนวดี หนึ่งดวงกมล[1] ขวัญทิพย์ สนธยาสถาพร[1] สวรินทร์ ทองแก้ว[1] และ เยาวภา หล่อเจริญผล[1*]

Noppawan Noomsiri[1], Thanawadee Nungduangkamon[1], Kwanthip Sonthayasathaporn[1], Sawarin Thongkaew[1] and Yaowapa Lorjaroenphon[1*]

บทคัดย่อ

ข้าวฟ่างเป็นธัญชาติที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงแต่มีมูลค่าต่ำ การแปรรูปด้วยวิธีการคั่วแตกจะช่วยเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความชื้นเมล็ดข้าวฟ่างต่อสัดส่วนการคั่วแตกและปริมาตรหลังการคั่วแตก การทดลองเริ่มจากแช่เมล็ดข้าวฟ่างในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วอบปรับความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 120 นาที ก่อนนำไปคั่วแตกด้วยเครื่องทำข้าวโพดคั่วเทียบกับข้าวฟ่างที่มีความชื้นเริ่มต้น 9.51% (ตัวอย่างควบคุม) จากผลการทดลองพบว่าข้าวฟ่างที่อบนาน 60 และ 70 นาที ซึ่งมีความชื้น 15.09 และ 13.16% ตามลำดับ มีสัดส่วนการคั่วแตกและปริมาตรหลังการคั่วแตกสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างที่อบนาน 60 นาทีกับข้าวโพดคั่ว พบว่าข้าวฟ่างคั่วมีปริมาณไขมัน a_w และค่าสี b* ต่ำกว่า ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่างทั้งสองไปเคลือบเนยเพื่อทดสอบผู้บริโภคจำนวน 50 คน พบว่าข้าวฟ่างคั่วรสเนยมีคะแนนความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากข้าวโพดคั่วรสเนย ($p > 0.05$)

Abstract

Sorghum is an inexpensive cereal which contains high nutrition value. Popping process may create a value-added product. This research aims to study effect of moisture content of sorghum on expansion ratio and popped volume. Sorghum was soaked in water at room temperature for 5 h, and was dried at 60 °C for 15, 30, 45, 60, 75 and 120 min before popping by popcorn machine. Grain with 9.51% initial moisture content was used as the control sample. The results revealed that sorghum samples dried for 60 and 70 min (15.09 and 13.16% moisture, respectively) had highest expansion ratio and popped volume ($p \leq 0.05$). The comparison on chemical and physical characteristics also indicated that fat content, a_w, and color b* of popped sorghum dried for 60 min were lower than those of popcorn ($p \leq 0.05$). In addition, the consumer testing (n = 50) revealed that there was no significant difference in the overall acceptability between butter flavored popped sorghum and butter flavored popcorn ($p > 0.05$).

Key Words: popped sorghum, pop expansion, expansion ratio, popped volume, popcorn

*Corresponding author; e-mail address: **fagiypl@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University

คำนำ

ข้าวฟ่างเป็นธัญชาติที่มีมูลค่าต่ำและไม่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในประเทศไทย จึงไม่ได้รับความนิยมในการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร เมล็ดข้าวฟ่างมีขนาดเล็ก ลักษณะโครงสร้างคล้ายข้าวโพดทั้งในส่วน germ และ endosperm แต่มีเยื่อหุ้มเมล็ดและความหนาแน่นของ endosperm มากกว่าข้าวโพด อีกทั้งยังมีปริมาณองค์ประกอบแตกต่างกันเล็กน้อย โดยข้าวฟ่างมีปริมาณความชื้นและไขมันน้อยกว่าข้าวโพด แต่มีสตาร์ชและโปรตีนมากกว่า (Eckhoff and Watson, 2009) นอกจากนี้สตาร์ชข้าวฟ่างยังถูกย่อยได้ง่าย (Saravanabavan *et al*., 2013) ซึ่งดีต่อเด็กและผู้สูงอายุ จากโครงสร้างเมล็ดและองค์ประกอบที่คล้ายกันนี้ส่งผลให้ข้าวฟ่างมีคุณสมบัติในการคั่วแตกได้เช่นเดียวกับข้าวโพด โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการคั่วแตกของเมล็ดข้าวฟ่าง ได้แก่ สายพันธุ์ (Rooney and Rooney, 2013) ลักษณะของเมล็ด ขนาดของเมล็ด ปริมาณอะมิโลส ปริมาณไขมัน ปริมาณโปรตีน และ วิธีการคั่วแตก (Mishra *et al*., 2014) รวมถึงสภาพแวดล้อมที่ปลูก (Chavan *et al*., 2015) นอกจากนี้มีหลายงานวิจัยที่พบว่าความชื้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อลักษณะของข้าวโพดและข้าวฟ่างคั่ว ทั้งในด้านปริมาตรหลังการคั่วแตก ขนาดของชิ้นที่แตกออก และร้อยละของเมล็ดที่ไม่แตก (Gökmen, 2004; Gaul and Rayas-Duarte, 2008; Sharma *et al*., 2014) โดยความร้อนในการคั่วจะส่งผลให้เกิดการสะสมความดันเนื่องจากความชื้นภายในชั้น horny endosperm ที่ล้อมรอบอยู่ด้านนอกของโครงสร้างเมล็ด จนทำให้เมล็ดแตกออกและเจลแป้งขยายตัว (Hoseney *et al*., 1983) อย่างไรก็ตามวิธีการปรับความชื้นของเมล็ดข้าวฟ่างที่ทำโดยการเติมน้ำโดยตรงหรือการปรับความชื้นสัมพัทธ์ในภาชนะบรรจุเพื่อให้ได้ความชื้นของเมล็ดตามต้องการ (Gaul and Rayas-Duarte, 2008) ต้องใช้เวลานานซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำข้าวฟ่างมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวฟ่างคั่วเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่ผลิตภัณฑ์ โดยปรับความชื้นเมล็ดข้าวฟ่างด้วยการแช่น้ำและอบที่ระยะเวลาต่างๆ แล้ววิเคราะห์สัดส่วนการคั่วแตกและปริมาตรหลังการคั่วแตก รวมถึงเปรียบเทียบคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสเทียบกับข้าวโพดคั่ว

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การศึกษาผลของปริมาณความชื้นเมล็ดข้าวฟ่างต่อคุณลักษณะของข้าวฟ่างคั่ว

แช่เมล็ดข้าวฟ่างพันธุ์เคยู 439 (ไร่สุวรรณ จังหวัดสระบุรี) 80 กรัม ในน้ำสะอาดปริมาตร 250 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และนำมาซับน้ำส่วนเกินออกก่อนนำไปเกลี่ยเป็นชั้นเดียวบนตระแกรงที่ปูด้วยผ้าขาวบาง แล้วอบปรับความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด (tray dryer; Kan Seng Lee Machinery (1960) Co., Ltd., Thailand) ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 15, 30, 45, 60, 75 และ 120 นาที โดยมีเมล็ดข้าวฟ่างที่ไม่ผ่านการแช่น้ำและอบปรับความชื้นเป็นตัวอย่างควบคุม วิเคราะห์ความชื้นของตัวอย่างข้าวฟ่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ความชื้น (moisture balance; KEAN Co., Ltd., Germany) และคั่วแตกด้วยเครื่องทำข้าวโพดคั่ว (popcorn machine; Gold Well Co., Ltd., USA) ที่ระดับความร้อน 226 °C เป็นเวลา 3 นาที แล้ววิเคราะห์ 1) สัดส่วนการคั่วแตกที่คำนวณจากน้ำหนักเมล็ดข้าวฟ่างคั่วที่เกิดการแตกหารด้วยน้ำหนักเมล็ดข้าวฟ่างคั่วที่ไม่เกิดการแตก โดยดัดแปลงจากวิธีของ Mohamed *et al*. (1993) และ Dofing *et al*. (1990) และ 2) ปริมาตรหลังการคั่วแตก โดยนำเมล็ดข้าวฟ่างคั่วที่เกิดการแตก 10 กรัม ไปวัดปริมาตรด้วยกระบอกตวงขนาด 250 มิลลิลิตร ตามวิธีที่ของ Gökmen (2004) และ Rooney and Rooney (2013)

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS (Statistical Package for Social Science, version 19) หากพบความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

2. การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของข้าวฟ่างคั่วเทียบกับข้าวโพดคั่ว

วิเคราะห์ความชื้นและคั่วเมล็ดข้าวโพด (McGarrett; The American Popcorn Co., Ltd., USA) ด้วยเครื่องทำข้าวโพดคั่วเช่นเดียวกับการทดลองในข้อที่ 1 และวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพ ได้แก่ ปริมาณไขมัน ความชื้น a_w และ ค่าสี (L*, a*, b*) เทียบกับตัวอย่างข้าวฟ่างคั่วจากการทดลองในข้อที่ 1 ซึ่งมีสัดส่วนการคั่วแตกและปริมาตรหลังการคั่วแตกสูงที่สุด ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Independent two-sample *t*-test

3. การศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อข้าวฟ่างคั่วเคลือบเนย

3.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

ละลายเนยเค็ม (ออร์คิด; บริษัท อุตสาหกรรมนมไทย จำกัด, ประเทศไทย) 20 กรัม ที่อุณหภูมิ 70 °C แล้วเคลือบบนข้าวโพดคั่วหรือข้าวฟ่างคั่วจากการทดลองในข้อ 2 ด้วยหม้อเคลือบ (panning; Can Tech Engineering, Co., Ltd., Thailand)

3.2 วิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสและการวิเคราะห์ทางสถิติ

นำตัวอย่างทั้งสองจากข้อ 3.1 ไปทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค โดยคัดเลือกผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายที่รับประทานขนมขบเคี้ยวเป็นประจำจำนวน 50 คน นำเสนอตัวอย่างทั้งสองที่ใช้ด้วยเลขสุ่ม 3 หลักแทนชื่อตัวอย่างและสลับลำดับการนำเสนอตัวอย่างอย่างสมดุล โดยผู้ทดสอบแต่ละคนชิมตัวอย่างและให้คะแนนดังนี้ 1) ความชอบ (hedonic test) ต่อลักษณะโดยรวม สี กลิ่น และ ความกรอบ ด้วย 9-point scale โดย 9 = ชอบมากที่สุด และ 1 = ไม่ชอบมากที่สุด แล้ววิเคราะห์ผลด้วยวิธี paired sample *t*-test และ 2) ความพอดี (just about right test) ต่อลักษณะด้านสี กลิ่น และ ความกรอบ ด้วย 5-point scale โดย 1 = น้อยเกินไป และ 5 = มากเกินไป แล้ววิเคราะห์ผลโดยการแจกแจงความถี่ จากนั้นให้ผู้ทดสอบแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับ 3) food action rating test ด้านความสนใจในการรับประทานและความสนใจในการซื้อผลิตภัณฑ์ข้าวฟ่างคั่วเคลือบเนยหากมีจำหน่ายในท้องตลาด โดยวิเคราะห์ผลด้วยการแจกแจงความถี่

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การศึกษาผลของปริมาณความชื้นเมล็ดข้าวฟ่างต่อคุณลักษณะของข้าวฟ่างคั่ว

เมล็ดข้าวฟ่างมีปริมาณความชื้นเริ่มต้น 9.51% (ตัวอย่างควบคุม) ไม่เหมาะสมในการนำมาแปรรูปด้วยวิธีคั่วแตก คือมีสัดส่วนการคั่วแตกต่ำที่สุดเพียง 0.26 (Table 1) เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่จะทำให้เกิดความดันไอไม่เพียงพอในการทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดแตกออก นอกจากนี้ยังมีปริมาตรหลังการคั่วแตก 74.67 ลูกบาศก์เซนติเมตร/10 กรัม ซึ่งน้อยกว่าข้าวโพดคั่วจากการทดลองของ Gökmen (2004) ที่มีปริมาตร 280 ลูกบาศก์เซนติเมตร/10 กรัม ทั้งนี้เพราะเมล็ดข้าวฟ่างมีขนาดเล็ก อีกทั้งยังมีเยื่อหุ้มเมล็ดหนากว่าและมีความหนาแน่น

ของ endosperm มากกว่าเมล็ดข้าวโพด (Eckhoff and Watson, 2009) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับความชื้นให้เหมาะสมก่อนการคั่วแตก โดยในการทดลองนี้ใช้วิธีแช่น้ำเพื่อให้น้ำซึมผ่านเข้าทาง germ สู่ floury endosperm ที่มีรูพรุน ทำให้ความชื้นในเมล็ดมากขึ้น และเมื่อให้ความร้อนโดยการคั่วแตกจะเกิดการสะสมของความดันภายในชั้น horny endosperm ที่ล้อมอยู่ด้านนอก จนความดันมากพอให้เกิดการแตกออกและเจลแป้งขยายตัว (Hoseney *et al*., 1983)

จากการทดลองอบปรับความชื้นเมล็ดข้าวฟ่างที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าปริมาณความชื้นลดลงตามระยะเวลาการอบ (Table 1) โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นกับผลการคั่วแตก พบว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนการคั่วแตกและปริมาตรหลังการคั่วแตกเพิ่มขึ้น (Figure 1) จนถึงระดับความชื้น 13.16-15.09% (อบนาน 75 และ 60 นาที ตามลำดับ) จากนั้นเมื่อมีความชื้นสูงขึ้นกลับส่งผลให้สัดส่วนการคั่วแตกและปริมาตรหลังการคั่วแตกลดลง เนื่องจากเมื่อความชื้นภายในเมล็ดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการหลอมเหลวของ pericarp จะต่ำลง การแตกออกของเยื่อหุ้มเมล็ดจึงเกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่มีความดันภายในเมล็ดต่ำลง เป็นสาเหตุให้การขยายปริมาตรลดลง (Gökmen, 2004) นอกจากนี้ Sharma *et al.* (2014) ยังอธิบายว่าความชื้นที่สูงเกินไปจะเกิดการสูญเสียการเชื่อมกันของโครงสร้าง lemma และ palea (interlocking) ในเยื่อหุ้มเมล็ดทำให้มีความดันภายในไม่เพียงพอให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นความชื้น 13.16-15.09% จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมหรือเรียกว่าเป็นค่าความชื้นวิกฤตของเมล็ดข้าวฟ่างพันธุ์เคยู 439 ในการทำข้าวฟ่างคั่ว ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Gaul and Rayas (2008) ที่พบว่าข้าวฟ่างความชื้น 15% มีประสิทธิภาพการคั่วแตกและการขยายตัวสูงสุด เช่นเดียวกับการทดลองของ Gökmen (2004) ที่รายงานว่าข้าวโพดความชื้น 14% มีร้อยละการคั่วแตก ขนาดชิ้น และปริมาณหลังการคั่วแตกสูงสุด รวมถึง Shimomi *et al*. (2002) ที่วิเคราะห์ปริมาณหลังการคั่วแตกสูงสุดเมื่อข้าวโพดมีความชื้น 15.51%

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าตัวอย่างที่เตรียมจากข้าวฟ่างความชื้น 13.16 และ 15.09% มีค่าสัดส่วนการคั่วแตกและปริมาตรหลังการคั่วแตกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 1) แต่ควรเลือกใช้เมล็ดข้าวฟ่างที่มีความชื้น 15.09% เนื่องจากใช้เวลาในการอบสั้นกว่า และยังช่วยประหยัดต้นทุนค่าพลังงานอีกด้วย

Table1 Moisture content, expansion ratio and popped volume of sorghum drying at different time

drying time (min)	moisture content	popped sorghum	
	(%)	expansion ratio	popped volume (cm^3/10 g)
control sample (initial grain)	9.51 ± 0.67^{a}	0.26 ± 0.07^{a}	74.67 ± 12.22^{a}
15	23.98 ± 1.55^{e}	0.97 ± 0.07^{bc}	72.67 ± 6.11^{a}
30	17.64 ± 0.94^{d}	1.33 ± 0.23^{c}	97.00 ± 19.08^{bc}
45	15.87 ± 1.83^{cd}	1.82 ± 0.42^{d}	95.00 ± 12.12^{bc}
60	15.09 ± 0.82^{bc}	2.39 ± 0.33^{e}	117.00 ± 8.89^{d}
75	13.16 ± 0.97^{b}	2.31 ± 0.10^{e}	113.67 ± 4.04^{cd}
120	10.25 ± 0.12^{a}	0.56 ± 0.26^{ab}	81.00 ± 4.58^{ab}

Different letters in superscript following mean ± standard deviation values indicate statistically significant differences ($p \leq 0.05$).

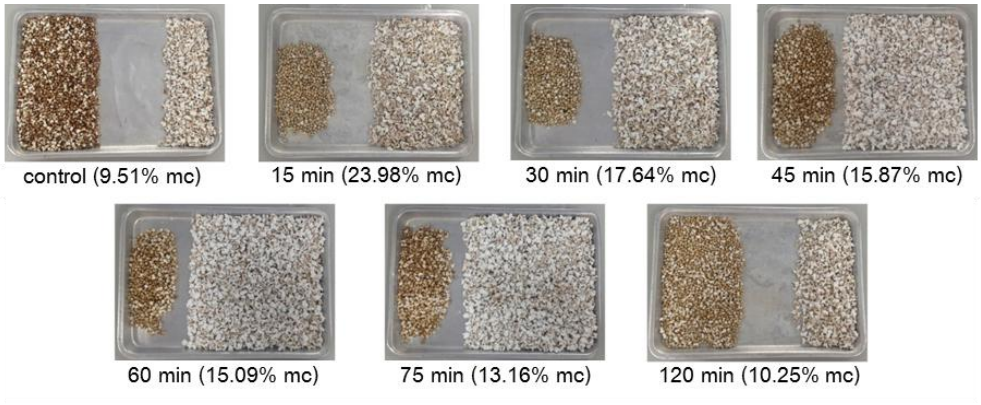


Figure 1 Popped sorghum prepared form raw sorghum at difference moisture content

2. การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของข้าวฟ่างคั่วเทียบกับข้าวโพดคั่ว

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างที่เตรียมจากข้าวฟ่างความชื้น 15.09% (อบนาน 60 นาที) เปรียบเทียบกับข้าวโพดคั่ว พบว่าข้าวฟ่างคั่วมีปริมาณไขมัน (2.55%) และ a_w (0.29) น้อยกว่าข้าวโพดคั่วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงใน Table 2 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Eckhoff and Watson (2009) ในขณะที่สี L* และ a* ของทั้งสองตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) แต่ข้าวโพดมีสีเหลือง (ค่า b*) มากกว่าข้าวฟ่าง

Table 2 Chemical and physical characteristics of popped sorghum and popcorn

characteristic	popped sorghum	popcorn	*p*-value
fat content (%)	2.55 ± 0.37	3.36 ± 0.20	0.045
moisture content (%)	4.49 ± 0.05	6.64 ± 0.32	0.061
a_w	0.29 ± 0.01	0.41 ± 0.01	<0.001
color: L*	80.79 ± 0.01	84.84 ± 1.04	0.114
a*	0.73 ± 0.07	1.14 ± 0.11	0.067
b*	5.96 ± 0.38	16.16 ± 0.04	0.016

3. การศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อข้าวฟ่างคั่วเคลือบเนย

ในการทดสอบความชอบและการยอมรับเปรียบเทียบระหว่างข้าวฟ่างคั่วเคลือบเนยและข้าวโพดคั่วเคลือบเนย โดยใช้ผู้บริโภคที่รับประทานขนมขบเคี้ยวเป็นประจำจำนวน 50 คน (ชาย 14 คน หญิง 36 คน) อายุระหว่าง 12-25 ปี พบว่าคะแนนความชอบโดยรวมและความชอบด้านกลิ่นของตัวอย่างทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงใน Table 3 แต่ข้าวฟ่างคั่วเคลือบเนยมีคะแนนความชอบด้านความกรอบมากกว่าข้าวโพดคั่วเคลือบเนย ในขณะที่ผู้บริโภคชอบสีของตัวอย่างข้าวโพดคั่วมากกว่า โดยเมื่อพิจารณาระดับความพอดีด้านสีจากการทดสอบด้วยวิธี just about right (Table 4) พบว่าผู้บริโภค 70% มีความเห็นว่าข้าวฟ่างคั่วเคลือบเนยมีสีอ่อนเกินไป ในขณะที่ 62% ของผู้บริโภคคิดว่าข้าวโพดคั่วเคลือบเนยมีสี

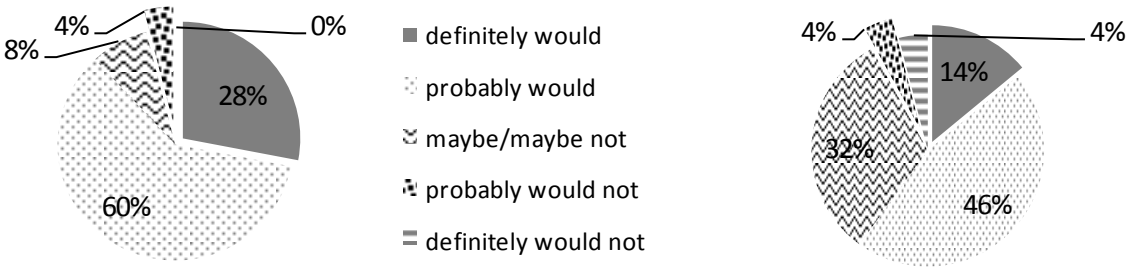
กำลังดีแล้ว ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากค่า b* ของข้าวโพดคั่วก่อนการเคลือบเนยที่มีค่าสูงกว่าข้าวฟ่างคั่ว (Table 2) และเมื่อพิจารณาค่า L* ของตัวอย่างทั้ง 2 ที่ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นข้าวฟ่างคั่วที่มีขนาดเล็กกว่าจึงมีพื้นที่ผิวสำหรับเคลือบเนยมากกว่าข้าวโพดคั่ว ส่งผลให้ข้าวฟ่างคั่วเคลือบเนยมีสีอ่อนกว่า นอกจากนี้ครึ่งหนึ่งของผู้บริโภคคิดว่าตัวอย่างข้าวฟ่างมีกลิ่นรสอ่อนเกินไป ดังนั้นจึงควรเพิ่มปริมาณของเครื่องปรุงรสเพื่อให้คะแนนการยอมรับด้านกลิ่นรสสูงขึ้น และยังอาจช่วยปรับปรุงคุณลักษณะด้านสีอีกด้วย ทั้งนี้ควรมีการปรับปรุงคุณลักษณะด้านความกรอบของข้าวฟ่างคั่วโดยเปลี่ยนไปใช้เครื่องปรุงรสแบบแห้งแทนการใช้เนยละลายซึ่งมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 16% (Gordon, 1997; Zijl and Klapwijk, 2000) อย่างไรก็ตามแม้ว่าคะแนนความชอบและการยอมรับของผู้บริโภคต่อคุณลักษณะด้านต่างๆ ของข้าวฟ่างคั่วจะไม่สูง แต่ผู้บริโภคมีความสนใจที่จะรับประทานและซื้อผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสูงถึง 88 และ 60% ตามลำดับ (Figure 2a และ Figure 2b)

Table 3 Means and standard deviations of hedonic scores for butter flavored popped sorghum and butter flavored popcorn

sensory attribute	butter flavored sample		*p*-value
	popped sorghum	popcorn	
overall	5.46±1.73	5.68±2.00	0.416
color	5.38±1.82	6.92±1.45	<0.001
flavor	6.32±1.58	5.96±1.50	0.121
crunchiness	5.60±2.19	4.12±2.19	<0.001

Table 4 Frequency distribution (%) of just about right test for butter flavored popped sorghum and butter flavored popcorn

Sensory attribute		butter flavored sample	
		popped sorghum	popcorn
color	too low	70	38
	just right	20	62
	too high	10	0
flavor	too low	50	50
	just right	40	36
	too high	10	18
crunchiness	too low	48	94
	just right	44	6
	too high	8	0



(a) (b)

Figure 2 Distribution (%) of food action rating test for eating (a) and buying (b) of popped sorghum

สรุป

การคั่วเมล็ดข้าวฟ่างที่ปรับความชื้นประมาณ 15% โดยการนำไปแช่น้ำและอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่สั้นที่สุด จะมีสัดส่วนการคั่วแตกและปริมาตรหลังการคั่วแตกสูงสุด นอกจากนี้ยังมีปริมาณไขมัน a_w และค่าสี b* ต่ำกว่าข้าวโพดคั่ว และเมื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าคะแนนความชอบด้านความกรอบของข้าวฟ่างคั่วเคลือบเนยสูงกว่าข้าวโพดคั่วเคลือบเนย อีกทั้งผู้บริโภคยังให้ความสนใจในการรับประทานและเลือกซื้อข้าวฟ่างคั่วเคลือบเนยหากมีจำหน่ายในท้องตลาด

เอกสารอ้างอิง

Chavan, U.D., U.S. Dalvi, G.H. Pawar and M.S. Shinde. 2015. Selection of genotype and development of technology for sorghum pops production. **Acta Biomedica Scientia** 2(2): 100-105.

Dofing, S.M., M.A. Thomas-Compton and J.S. Buck. 1990. Genotype × popping method interaction for expansion volume in popcorn. **Crop Science** 30:62-65.

Eckhoff, S.R. and S.A. Watson. 2009. Corn and sorghum starches: Production, pp. 373-439. *In* J.N. BeMiller and R.L. Whistler, eds. **Starch: Chemistry and Technology**, 3rd ed. Academic Press, Oxford.

Gaul, J.A. and P. Rayas-Duarte. 2008. Effect of moisture content and tempering method on the functional and sensory properties of popped sorghum. **Cereal Chemistry** 85(3): 344-350.

Gökmen, S. 2004. Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. **Journal of Food Engineering** 65: 357-362.

Gordon, J. 1997. Dairy products, pp. 75-139. *In* M.D. Ranken, R.C. Kill and C.G.J. Baker, eds. **Food Industries Manual**, 24th ed. Blackie Academic and Professional, New York.

Hoseney, R.C., K. Zeleznak and A. Abdelrahman. 1983. Mechanism of popcorn popping. **Journal of Cereal Science** 1: 43-52.

Mishra, G., D.C. Joshi and B.K. Panda. 2014. Popping and puffing of cereal grains. **A Review: Journal of Grain Processing and Storage** 1(2): 34-36.

Mohamed, A.A., R.B. Ashman and A.W. Kirleis. 1993. Pericarp thickness and other kernel physical characteristics relate to microwave popping quality of popcorn. **Journal of Food Science** 58: 342-346.

Rooney, T.E. and W.L. Rooney. 2013. Genotype and environment effects on the popping characteristics of grain sorghum. **Journal of Crop Improvement** 27: 460-468.

Saravanabavan, S.N., M.M. Shivanna and S. Bhattacharya. 2013. Effect of popping on sorghum starch digestibility and predicted glycemic index. **Journal of Food Science and Technology** 50(2): 387-392.

Sharma, V., P.S. Champawat and V. Dmudgal. 2014. Process development for puffing of sorghum. **International Journal of Current Research and Academic Review** 2: 164-170.

Shimomi, E., E.M. Dirks and T.P. Labuza. 2002. The relation between final popped volume of popcorn and thermal-physical parameters. **Lebensm.-Wiss. U.-Technol.** 35: 93-98.

Zijl, M.M.V. and P.M. Klapwijk. 2000. Yellow fat products (butter, margarine, dairy and nondairy spreads), pp. 784-786. *In* B.M. Lund, T.C. Baird-Parker and G.W. Gould, eds. **The Microbiological Safety and Quality of Food**. Aspen Publishers, Inc., Maryland.

ประสิทธิภาพของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์

Efficacy of Vanillin-Coated Paperboard on Microbial Inhibition

พิมพ์วลัญป์ สมบูรณ์[1] ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์[1*] และ รังรอง ยกส้าน[1]

Pimwalun Somboon[1], Tunyarut Jinkarn[1*] and Rangrong Yoksan[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลิน ในการทดลองได้กำหนดระดับความเข้มข้นของวานิลลินในเอทานอลที่ร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 (w/v) ประสิทธิภาพในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ประเมินจากการสัมผัสกระดาษต้านจุลินทรีย์โดยตรงบนอาหารวุ้น (agar-disc diffusion method) โดยรายงานผลเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณต้านจุลินทรีย์ และวิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนืออาหารวุ้น (vapour-diffusion method) ประเมินจากเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีที่ลดลง โดยรายงานผลเป็นค่าดัชนีการต้านจุลินทรีย์ (Antimicrobial Idex) เชื้อจุลินทรีย์ในการทดสอบมี 3 ชนิด คือ *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายวานิลลินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น โดยมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *B. cereus* ดีที่สุด รองลงมาคือเชื้อ *S. aureus* และเชื้อ *E. coli* ตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ทดสอบโดยวิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนืออาหารวุ้นสามารถเห็นผลได้ที่ระดับความเข้มข้นของวานิลลินที่ต่ำกว่า เนื่องจากวานิลลินสามารถระเหยเป็นไอช่วยส่งเสริมการต้านเชื้อได้ดีขึ้น

ABSTRACT

The study aimed to evaluate antimicrobial efficacy of vanillin coated paperboard. The concentrations of vanillin powder in ethanol were 15, 20, 25, 30, 35 and 40% (w/v). Antimicrobial activities were evaluated through agar-disc diffusion method, reporting by clear zone diameters and vapour-diffusion method, determining the antimicrobial index. Three types of common pathogens and food spoilage bacteria were investigated composed of *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. The results show that, in both methods, the inhibitory effect of vanillin coated paperboard for specific types of bacteria depended on the concentrations of vanillin. The higher the concentration, the better the antimicrobial effectiveness. Moreover, vanillin coated paperboard showed better antimicrobial activity against *B. cereus* than *S. aureus* and *E. coli*, respectively. Comparing between the two testing methods, antimicrobial activities can be found at lower concentration of vanillin for the vapour-diffusion method since vanillin can evaporate and enhance the antimicrobial effect.

Key Words: vanillin, antimicrobial, paperboard, coating

* Corresponding author; e-mail address: **fagitvp@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Packaging and Materials Technology, The Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การพัฒนาวัสดุบรรจุให้มีสมบัติในการต้านเชื้อจุลินทรีย์โดยทำหน้าที่เป็นบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟ (Active packaging) ถือเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาในด้านนี้ในช่วงเวลาที่ผ่านมา เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์มีส่วนช่วยในการสร้างความปลอดภัยและยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Mangalassary, 2012; Silveira *et al*., 2015) บรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์สามารถทำได้ในหลายรูปแบบ เช่น บรรจุสารต้านจุลินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ในซอง เพื่อนำไปใส่ในบรรจุภัณฑ์ หรือการผสมสารต้านจุลินทรีย์ลงไปในวัสดุบรรจุโดยตรง เช่น ในบรรจุภัณฑ์พลาสติก ทั้งพลาสติกสังเคราะห์และพลาสติกชีวภาพ รวมทั้งในบรรจุภัณฑ์กระดาษ หรือการเคลือบลงบนผิวของวัสดุชนิดต่างๆ ทั้งนี้สารต้านจุลินทรีย์มีหลายประเภทและมีประสิทธิภาพในการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น กรดอินทรีย์ เอมีน เอนไซม์ โลหะ และน้ำมันหอมระเหยจากพืช (Appendini and Hotchkiss, 2002; Suppakul *et al*., 2003; Gabriel and Pineda, 2014)

วานิลลิน เป็นสารต้านจุลินทรีย์ที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายชนิดหนึ่ง เนื่องจากวานิลลินมีคุณสมบัติเด่นที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการต้านการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวก แบคทีเรียแกรมลบ ยีสต์ และรา (Cerrutti and Alzamora, 1996; Fitzgerald *et al*., 2004) การต้านปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Mourtzinos *et al*., 2009) คุณสมบัติของวานิลลินในการต้านการเจริญของจุลินทรีย์ เป็นผลมาจากหมู่ฟีนอลิกที่อยู่ในโครงสร้างของวานิลลิน นอกจากนี้ยังพบว่าวานิลลินมีโครงสร้างคล้ายกับยูจีนอล (eugenol) ซึ่งเป็นสารสำคัญในกานพลูที่มีคุณสมบัติในการต้านจุลินทรีย์ (Beuchat and Golden, 1989) การใช้วานิลลินเพื่อต้านจุลินทรีย์นั้น พบงานวิจัยที่ทดสอบประสิทธิภาพของสารละลายวานิลลินโดยเคลือบลงบนกระดาษแบบใช้แปรงปาด (Rakchoy *et al*., 2009) รวมถึงการใช้วานิลลินเติมลงในวัสดุบรรจุกลุ่มพอลิเมอร์ เช่น ฟิล์มไคโตซานหรือฟิล์มพอลิเมอร์ชีวฐาน (Stroescu *et al*., 2015; Sangsuwan *et al*., 2015) อย่างไรก็ตามการใช้วานิลลินในวัสดุบรรจุประเภทกระดาษ พบว่ายังมีงานวิจัยค่อนข้างน้อย ปัญหาส่วนหนึ่งคือการดูดซึมสารเคลือบสู่เส้นใยและโครงสร้างกระดาษทำให้จำเป็นต้องใช้วานิลลินที่ระดับความเข้มข้นสูงในการยับยั้งเชื้อ และยังไม่มีความชัดเจนในระดับความเข้มข้นของวานิลลินที่เหมาะสม อีกทั้งองค์ประกอบของกระดาษที่หลากหลายทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อมีความแตกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการพัฒนากระดาษแข็งเคลือบวานิลลิน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆของสารละลายวานิลลิน โดยการเคลือบกระดาษแบบ metering rod อีกทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจากแนวทางการทดสอบ 2 วิธี ได้แก่ การให้กระดาษแข็งเคลือบวานิลลินสัมผัสโดยตรงกับเชื้อจุลินทรีย์บนอาหารวุ้น และการให้ไอระเหยของวานิลลินที่เคลือบบนกระดาษแพร่ผ่านช่องว่างเหนืออาหารวุ้น ผลจากงานวิจัยจะสามารถใช้ประกอบในการตัดสินใจออกแบบระบบการบรรจุที่เหมาะสมสำหรับบรรจุภัณฑ์กระดาษต้านเชื้อจุลินทรีย์ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสารละลายวานิลลินและเคลือบกระดาษ

เตรียมสารละลายวานิลลิน (Vanillin; 4-Hydroxy-3-methoxybenzaldehyde) (Sigma-aldrich, USA) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 (w/v) โดยใช้เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 99.9 เป็นตัวทำละลาย จากนั้นคนสารละลายอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer) เป็นเวลา 1 ชม. จนสารละลายผสมเข้ากันดี นำสารละลายวานิลลินที่เตรียมได้ ปริมาณ 5.0 มล. เทลงบนกระดาษแข็ง Duplex

board (ด้านในสีเทา) ขนาด A4 โดยใช้เครื่องเคลือบกระดาษ (Tester Sangyo PI-1210, Japan) โดยชั้นฟิล์มที่เคลือบมีความหนาประมาณ 0.007±0.001 มม. จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม. และนำตัวอย่างไปเก็บที่อุณหภูมิ 27±2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±5 ก่อนนำไปทดสอบประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ ในการทดลองมีการกำหนดตัวอย่างควบคุม ได้แก่ กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ (control) และกระดาษที่เคลือบด้วยเอทานอลเพียงอย่างเดียว (ethanol)

การทดสอบประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินโดยการสัมผัสกระดาษต้านจุลินทรีย์โดยตรงบนอาหารวุ้น (agar-disc diffusion method)

เชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ที่ใช้ทดสอบได้แก่ *Bacillus cereus* DMST 5040, *Staphylococcus aureus* DMST 8840 และ *Escherichia coli* DMST 4212 (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, ประเทศไทย) ที่ความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์จำนวน 10^6 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ใช้เทคนิค pour plate โดยหยดเชื้อจุลินทรีย์ทดสอบปริมาณ 1.0 มล. ลงในจานเพาะเชื้อและเทอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นหมุนจานเพาะเชื้อเพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์และอาหารเลี้ยงเชื้อกระจายทั่วจานเพาะเชื้อ รอให้อาหารเลี้ยงเชื้อแข็งตัวอย่างน้อย 30 นาที ตัดกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินแต่ละความเข้มข้นให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.40 มม. อบฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำกระดาษวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยให้ด้านที่มีการเคลือบวานิลลินสัมผัสกับเชื้อจุลินทรีย์ ปิดฝาจานเพาะเชื้อและปิดผนึกโดยรอบด้วยพาราฟิล์ม บ่มจานเพาะเชื้อในตู้เพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชม. จากนั้นประเมินประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ โดยบันทึกเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณต้านจุลินทรีย์

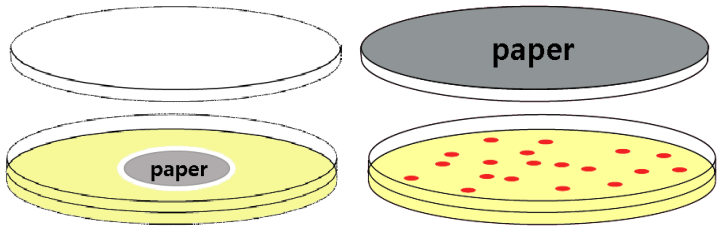


Figure 1 Antimicrobial test procedures (a) agar-disc diffusion method (b) vapour-diffusion method

การทดสอบประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินโดยวิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนืออาหารวุ้น (vapour-diffusion method)

ทดสอบตามวิธีการของ Sanla-Ead *et al*. (2006) โดยเทอาหารเลี้ยงเชื้อลงในจานเพาะเชื้อ รอให้แข็งตัวอย่างน้อย 30 นาที จากนั้นนำจุลินทรีย์บริสุทธิ์แต่ละชนิด ได้แก่ *B. cereus*, *S. aureus* และ *E. coli* ที่ความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์จำนวน 50 โคโลนี ปริมาณ 0.1 มล. หยดลงบนผิวหน้าวุ้น จากนั้นใช้แท่งแก้วสามเหลี่ยมเกลี่ยให้จุลินทรีย์กระจายทั่วจานเพาะเชื้อ โดยใช้เทคนิค spread plate ตัดกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินที่แต่ละความเข้มข้น เส้นผ่านศูนย์กลาง 8.7 ซม. (เท่ากับขนาดฝาของจานเพาะเชื้อ) อบกระดาษเพื่อฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีเป็นเวลา 2 นาที แล้วติดกระดาษไว้ใต้ฝาของจานเพาะเชื้อ จากนั้นนำฝามาประกบกับจานเพาะเชื้อและปิดผนึกโดยรอบด้วยพาราฟิล์ม บ่มจานเพาะเชื้อในตู้เพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37±2 องศาเซลเซียส 18-24 ชม.

ประเมินประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์โดยบันทึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีที่เจริญเติบโตเปรียบเทียบกับตัวควบคุม และนำไปแทนค่าในสูตร (1) เพื่อรายงานเป็นค่าดัชนีการต้านจุลินทรีย์ (Antimicrobial Idex)

$$\text{Antimicrobial index} = (Ø_C - Ø_M)/ Ø_C \quad (1)$$

เมื่อ $Ø_C$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเมื่อทดสอบด้วยกระดาษไม่เคลือบ

$Ø_M$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเมื่อทดสอบด้วยกระดาษเคลือบวานิลลิน

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลิน โดยการสัมผัสกระดาษต้านจุลินทรีย์โดยตรงบนอาหารวุ้น

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 (w/v) พบว่า กระดาษแข็งที่เป็นตัวควบคุมทั้ง 2 ชนิด และกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 (w/v) ไม่ปรากฏบริเวณใส (Inhibition zone) ใต้พื้นที่สัมผัสของกระดาษ จึงไม่สามารถวัดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณต้านจุลินทรีย์ได้ โดยสารละลายวานิลลินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 (w/v) ขึ้นไปเริ่มปรากฏบริเวณใสใต้พื้นที่สัมผัสของกระดาษ และสามารถวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่บริเวณดังกล่าวได้ นอกจากนี้พบว่าเชื้อ *B. cereus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก ถูกยับยั้งจากการทดสอบด้วยกระดาษเคลือบวานิลลินได้ดีที่สุด โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณต้านจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 17.12-27.34 มม. โดยที่ความเข้มข้นร้อยละ 35 และ 40 (w/v) มีเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณต้านจุลินทรีย์ใหญ่กว่าขนาดชิ้นกระดาษทดสอบ (กระดาษทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.40 มม.) แสดงว่าเกิดบริเวณต้านจุลินทรีย์นอกพื้นที่สัมผัสของกระดาษ เป็นบริเวณยับยั้ง (inhibition zone) ซึ่งปรากฏให้เห็นเป็นบริเวณใสล้อมรอบชิ้นกระดาษทดสอบ สำหรับเชื้อ *S. aureus* เกิดบริเวณยับยั้งที่ความเข้มข้นร้อยละ 40 (w/v) เพียงความเข้มข้นเดียว และเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณต้านจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 18.54-27.20 มม. สำหรับการทดสอบเชื้อ *E. coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ พบว่ากระดาษแข็งเคลือบวานิลลินมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อ *E. coli* ได้ต่ำที่สุด เนื่องจากทุกระดับความเข้มข้นของสารละลายวานิลลินไม่ส่งผลให้เกิดบริเวณยับยั้ง โดยบริเวณใสที่ปรากฏให้เห็นนั้นยังอยู่ภายใต้พื้นที่สัมผัสของกระดาษ (Table 1)

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า กระดาษเคลือบวานิลลินสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์แกรมบวกเช่น *B. cereus* ได้ดีกว่า *E. coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่มีความทนทานสูงกว่าเนื่องจากความสามารถในการซึมผ่านของสารผ่านผนังเซลล์ หรือกลไกการไหลเวียนของสารของเยื่อหุ้มเซลล์ (Shanab *et al*., 2004; Mahboobi *et al*., 2006) และเนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบมีส่วนของผนังเซลล์ชั้นนอกที่เป็นชั้นของไขมันซึ่งอยู่ถัดจากชั้นเปบติโดไกลแคน ส่งผลให้กั้นการซึมผ่านของสารได้ดีกว่า (Nikaido, 2003) ในขณะที่แบคทีเรียแกรมบวกมีเพียงชั้นของเปบติโดไกลแคนที่ห่อหุ้มตัวเซลล์ โดยไม่มีชั้นของไขมันห่อหุ้ม เป็นสาเหตุที่ส่งผลให้แบคทีเรียแกรมบวกมีความไวต่อสารต้านการเจริญของจุลินทรีย์มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (Pelissari *et al*., 2009)

Table 1 Antimicrobial activity of vanillin coated paperboard (agar-disc diffusion method)

Paper sample	Inhibition zone (mm)		
	B. cereus	*S. aureus*	*E. coli*
Control	-	-	-
Ethanol	-	-	-
15% (w/v) Vanillin	-	-	-
20% (w/v) Vanillin	17.12^{aA}±0.61	18.54^{aA}±1.40	17.26^{aA}±1.30
25% (w/v) Vanillin	19.62^{bA}±1.32	19.76^{aA}±1.17	18.81^{bA}±1.52
30% (w/v) Vanillin	23.79^{cB}±0.46	22.82^{bB}±1.31	18.93^{bA}±0.51
35% (w/v) Vanillin	26.52^{dC}±0.44	24.13^{bB}±1.60	21.84^{cA}±1.03
40% (w/v) Vanillin	27.34^{dB}±1.00	27.20^{cB}±0.85	22.55^{cA}±1.19

$^{a-d}$ Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

$^{A-C}$ Means within the same row followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

การศึกษาประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินโดยวิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนือวุ้น

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 (w/v) ด้วยวิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนืออาหารวุ้น พบว่าค่าดัชนีการต้านจุลินทรีย์ของกระดาษไม่เคลือบและกระดาษเคลือบเอทานอลซึ่งเป็นตัวควบคุมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในทุกชนิดของจุลินทรีย์ โดยเอทานอลที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบนั้นไม่มีผลต่อการต้านจุลินทรีย์ เนื่องจากมีการระเหยไประหว่างเตรียมกระดาษเคลือบจนหมดหรือมีปริมาณคงเหลือน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 (w/v) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารเคลือบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการต้านจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นด้วย (Table 2, Figure 2) และประสิทธิภาพในการต้านเชื้อเริ่มสังเกตุเห็นในทุกชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 (w/v) อีกทั้งที่ความเข้มข้นของสารละลายวานิลลินร้อยละ 25, 30 และ 35 (w/v) พบว่าประสิทธิภาพในการต้านเชื้อ *B. cereus* ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ลักษณะเช่นนี้พบใน เชื้อ *S. aureus* และเชื้อ *E. coli* เช่นกัน ซึ่งที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายวานิลลินใกล้เคียงกันอาจไม่เห็นความแตกต่างของกิจกรรมการต้านจุลินทรีย์ จะเห็นได้ว่าวิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนือวุ้นนั้นอาจไม่เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์หากระดับความเข้มข้นของสารใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจขึ้นกับความสามารถในการปลดปล่อยไอระเหยของสารแอคทีฟในวัสดุประกอบด้วย ซึ่งการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อวิเคราะห์ปริมาณวานิลลินบนช่องว่างเหนือวุ้นจะสามารถใช้ข้อมูลเพื่อสรุปผลได้ชัดเจนมากขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้ในลำดับต่อไป และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของจุลินทรีย์ทดสอบทั้งหมด พบว่า เชื้อ *B. cereus* มีดัชนีการต้านจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 0.25-0.45 ซึ่งแสดงว่ากระดาษแข็งเคลือบวานิลลินมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อ *B. cereus* ได้ดีที่สุด รองลงมาคือเชื้อ *S. aureus* และเชื้อ *E. coli* ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการทดสอบประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินโดยการสัมผัสโดยตรงกับเชื้อจุลินทรีย์บนอาหารวุ้น รวมถึงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fisher and Phillips

(2006) ที่ได้ศึกษาผลของน้ำมันหอมระเหยจากมะนาว ส้มและมะกรูด ด้วยวิธี disc diffusion พบว่าน้ำมันหอมระเหยดังกล่าวสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่าแกรมลบ โดยงานวิจัยดังกล่าวใช้เชื้อแบคทีเรียแกรมบวก คือ *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* และ *Bacillus cereus* ส่วนแกรมลบ คือ *Escherichia coli* และ *Campylobacter jejuni* และใช้วิธีการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณต้านจุลินทรีย์เพื่อเป็นการประเมินการต้านเชื้อแบคทีเรีย

Table 2 Antimicrobial activity of vanillin coated paperboard (vapour-diffusion method)

Paper sample	Antimicrobial Idex		
	B. cereus	*S. aureus*	*E. coli*
No paper	0^{aA}	0^{aA}	0^{aA}
Control	0^{aA}	0^{aA}	0^{aA}
Ethanol	0^{aA}	0^{aA}	0^{aA}
15% (w/v) Vanillin	0.25^{bB}	0.05^{bA}	0.06^{bA}
20% (w/v) Vanillin	0.35^{cB}	0.11^{cA}	0.10^{cA}
25% (w/v) Vanillin	0.41^{dC}	0.17^{dB}	0.11^{cA}
30% (w/v) Vanillin	0.40^{dC}	0.19^{dB}	0.16^{dA}
35% (w/v) Vanillin	0.43^{dC}	0.22^{eB}	0.19^{eA}
40% (w/v) Vanillin	0.45^{eC}	0.24^{fB}	0.19^{eA}

[a-f] Means within the same column followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

[A-C] Means within the same row followed by different letters were significantly different ($p \leq 0.05$).

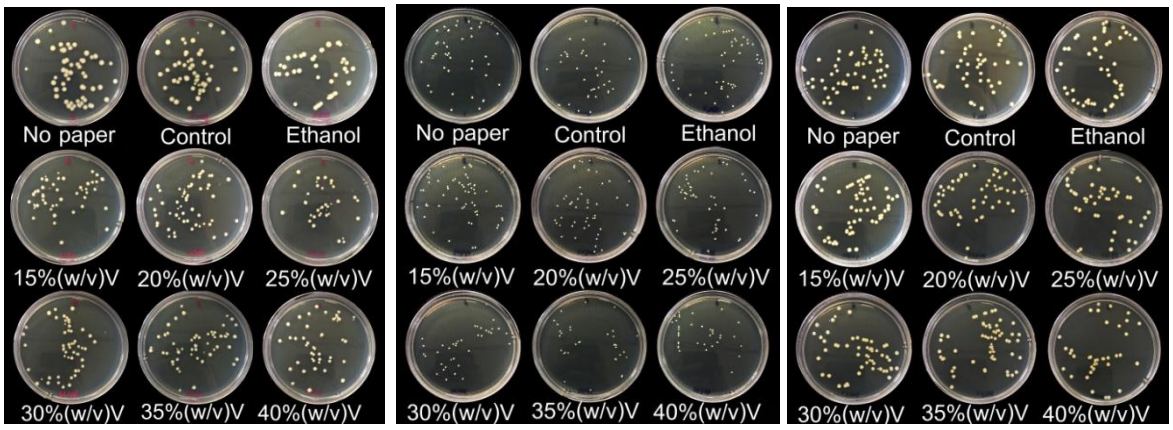


Figure 2 The antibacterial effect of vanillin coated paperboard (vapour-diffusion method)

นอกจากนี้พบว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ของกระดาษเคลือบด้วยวิธีการสัมผัสโดยตรงกับเชื้อจุลินทรีย์บนอาหารวุ้น และวิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนืออาหารวุ้น พบว่า วิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนือวุ้นนั้น สามารถแสดงผลการยับยั้งเชื้อได้ที่ระดับความเข้มข้นของสารเคลือบที่ต่ำกว่าวิธีการสัมผัสโดยตรง

กับเชื้อจุลินทรีย์บนอาหารวุ้น ทั้งนี้เนื่องจากวานิลลินเป็นกลุ่มสารที่ระเหยได้ดีและสามารถส่งผลยับยั้งเชื้อได้จากไอระเหยที่ปลดปล่อยจากกระดาษทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในวิธีการสัมผัสโดยตรงกับกระดาษเคลือบวานิลลินนั้นอาจสามารถต้านเชื้อได้ในบริเวณที่สัมผัสและสามารถเกิดบริเวณยับยั้ง (inhibition zone) โดยรอบวัสดุได้เช่นกัน ณ ระดับความเข้มข้นของสารเคลือบที่ค่อนข้างสูง

สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ของกระดาษแข็งเคลือบวานิลลินด้วยการสัมผัสโดยตรงกับเชื้อจุลินทรีย์บนอาหารวุ้น และวิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนืออาหารวุ้น พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายวานิลลินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการต้านจุลินทรีย์ทั้งสองวิธีเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยกระดาษเคลือบวานิลลินทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *B. cereus* ได้ดีที่สุด รองลงมาคือเชื้อ *S. aureus* และเชื้อ *E. coli* ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า ประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ของวิธีการแพร่ผ่านช่องว่างเหนือวุ้นนั้นสามารถแสดงผลการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ตั้งแต่ความเข้มข้นร้อยละ 15 (w/v) ขึ้นไป ซึ่งยับยั้งได้ดีกว่าวิธีการสัมผัสกระดาษโดยตรงบนอาหารวุ้นที่ยับยั้งได้ตั้งแต่ร้อยละ 20 (w/v) เป็นต้นไป โดยการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวิธีการบรรจุให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหาร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Appendini, P. and J. H. Hotchkiss. 2002. Review of antimicrobial food packaging. **Innovative Food Science and Emerging Technologies** 3: 113-126.

Beuchat, L.R. and D.A. Golden. 1989. Antimicrobials occurring naturally in foods. **Food Technology** 43: 134-142.

Cerrutti, P. and S.M. Alzamora. 1996. Inhibitory effects of vanillin on some food spoilage yeasts in laboratory media and fruit purees. **International Journal of Food Microbiology** 29: 379-386.

Fisher, K. and C.A. Phillips. 2006. The effect of lemon, orange and bergamot essential oils and their components on the survival of Campylobacter jejuni, *Escherichia coli* O157, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus cereus* and *Staphylococcus aureus* in vitro and in food systems. **Journal of Applied Microbiology** 101: 1232-1240.

Fitzgerald, D.J., M. Stratford, M.J. Gasson, J. Ueckert, A. Bos and A. Narbad. 2004. Mode of antimicrobial action of vanillin against *Escherichia coli, Lactobacillus plantarum* and *Listeria innocua*. **Journal of Applied Microbiology** 97: 104-113.

Gabriel, A.A. and J.K.F. Pineda. 2014. Influences of vanillin and licorice root extract supplementations on the decimal reduction times of *Escherichia coli* O157:H7 in mildly heated young coconut liquid endosperm. **Food Control** 38 : 136-141.

Mahboobi, M., F. Shahcheraghi and M.M. Feizabadi. 2006. Bacteriacidal effecys of essential oils from clove, lavender and geranium on multi-drug resistant isolate of Pseudomonas aeruginosa. **Iranian Journal of Biotechnology** 4: 137-140.

Mangalassary, S. 2012. Antimicrobial Food Packaging to Enhance Food Safety: Current Developments and Future Challenges. **Journal of Food Processing and Technology** 3(5).

Mourtzinos, I., S. Konteles, N. Kalogeropoulos and V.T. Karathanos. 2009. Thermal oxidation of vanillin affects its antioxidant and antimicrobial properties. **Food Chemistry** 114: 791-797.

Nikaido, H. 2003. Molecular basis of bacterial outer membrane permeability revisited. **Microbiology and Molecular Biology Reviews** 67: 593-656.

Pelissari, M.F., M.V.E. Grossmann, F. Yamashita and E.A.G. Pineda. 2009. Antimicrobial, mechanical and barrier properties of cassava starch-chitosan films incorporated with oregano essential oil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 57: 7499-7504.

Rakchoy, S., P. Suppakul and T. Jinkarn. 2009. Antimicrobial effects of vanillin coated solution for coating paperboard intended for packaging bakery products. **Asian Journal of Food and Agro-Industry** 2: 138-147.

Sangsuwan. J., N. Rattanapanone and I. Pongsirikul. 2015. Development of active chitosan films incorporating potassium sorbate or vanillin to extend the shelf life of butter cake. **International Journal of Food Science and Technology** 50: 323-330.

Sanla-Ead, N., A. Jangchud, V. Chonhenchob and P. Suppakul. 2006. Antimicrobial activity of cinnamon, clove and galangal essential oils and their principle constituents, and possible application in active packaging. *In* **Proceedings of the 15th IAPRI World Conference on Packaging 2006**. Tokyo, Japan.

Shanab, B.,G. Adwan, D. Safiya and K. Adwan. 2004. Antibacterial activities of some plant extracts utilized in popular medicine in Palestine. **Turkish Journal of Biology** 28: 99-102.

Silveira, A.C., G.C. Moreira, F. Artés and E. Aguayo. 2015. Vanillin and cinnamic acid in aqueous solutions or in active modified packaging preserve the quality of fresh-cut Cantaloupe melon. **Scientia Horticulturae** 192: 271-278.

Stroescu, M., A.S. Guzun, G. Isopencu, S. I. Jinga, O. Parvulescu, T. Dobre and M. Vasilescu. 2015. Chitosan-vanillin composites with antimicrobial properties. **Food Hydrocolloids** 48: 62-71.

Suppakul, P., J. Miltz, K. Sonneveld and S.W. Bigger. 2003. Active Packaging Technologies with an Emphasis on Antimicrobial Packaging and its Applications. **Journal of Food Science** 68: 408-420.

การเปรียบเทียบผลการดำเนินงานของกองทุนรวมหุ้นระยะยาว (LTF) และกองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ (RMF) ที่บริหารโดยบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุนที่ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์และบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุนที่ไม่ได้ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์

LTF and RMF Performance Comparison between bank and non-bank affiliate mutual funds

กัญญารัตน์ โพธิ์ศรีวิลัย[1*] และ ธนโชติ บุญวรโชติ[1]

Kanyarat Posrivilai[1*] and Tanachote Boonvorachote[1]

บทคัดย่อ

การศึกษาเปรียบเทียบผลการดำเนินงานของกองทุน LTFและ RMF ที่ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์ (bank affiliate) และที่ไม่ได้ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์(non-bank) พบว่าค่า Sharpe ratio ของ LTF ทั้งสองกลุ่มและ bank affiliate RMF มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือ 0.09 มากกว่าของ non-bank affiliate RMF คือ 0.038 สรุปได้ว่ากองทุนแต่ละกลุ่มมีผลตอบแทนใกล้เคียงกัน ในด้านผลตอบแทนส่วนเกินของทุกกลุ่มมีค่าเป็นบวกและใกล้เคียงกับตลาด ยกเว้น bank affiliate LTF มีค่าติดลบเล็กน้อยคือ -0.001 แต่ค่าธรรมเนียมการจัดการของ Non-bank affiliate มีค่าสูงกว่าอาจเพราะมีขนาดกองทุนที่เล็กกว่าดังนั้นผู้จัดการกองทุนควรมีนโยบายกระตุ้นให้มีการขยายตัวของกลุ่ม Non-bank affiliate เพื่อให้ค่าธรรมเนียมการจัดการต่ำลงและ ยังพบว่าความเสี่ยงของทุกกลุ่มมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการขึ้นลงจะน้อยกว่าตลาด และการวิเคราะห์จังหวะเวลาการลงทุนพบว่าค่าเฉลี่ย TM Timing ของ LTF ทั้งสองกลุ่มมีค่าเฉลี่ยเป็นบวกใกล้เคียงกัน ส่วน TM Timing ของ RMF ทั้งสองกลุ่มมีค่าเฉลี่ยติดลบ แสดงถึงกลุ่ม RMF ยังจับจังหวะการเข้าตลาดได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับกลุ่ม LTF ทั้งสองกลุ่ม

ABSTRACT

The study on LTF and RMF Performance Comparison between bank and non-bank affiliate mutual funds. The results founded that Sharpe ratio of both LTF and bank affiliate RMF have a similarly average is 0.09 more than non-bank affiliate RMF are 0.038. Conclude that each group of funds have nearly returns. The excess returns of each group are positive and are similar to market value unless The bank affiliate LTF have negative are -0.001 but management fee of Non-bank affiliate are higher because there are small funds size.The risk of all group are negative and The average of TM Timing of both LTF are positive whereas The average of TM Timing of both RMF are negative showed that the market timing ability of RMF also not good as the LTF both groups.

Key Words: LTF, RMF, Mutual funds, CAPM, Sharpe ratio, Thailand

* Corresponding author; e-mail address: **po.kanyarat@gmail.com**

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

กองทุนรวม เป็นเครื่องมือในการลงทุน (investment vehicle) สำหรับผู้ลงทุนรายย่อย ที่ประสงค์จะนำเงินมาลงทุนในตลาดเงินตลาดทุน แต่ติดขัดด้วยอุปสรรคหลายประการ ที่ทำให้การลงทุนด้วยตนเองไม่สามารถได้ผลลัพธ์ตามเป้าหมายที่ต้องการ เช่น มีทุนทรัพย์จำนวนจำกัด ไม่สามารถกระจายการลงทุนในหลักทรัพย์ต่างประเภทได้มากพอ เพื่อลดความเสี่ยงจากการลงทุน ไม่มีประสบการณ์ และไม่มีเวลาติดตามข้อมูลเพื่อใช้ในการตัดสินใจการลงทุน กองทุนรวมจึงเป็นเครื่องมือในการลงทุนที่มีประสิทธิภาพ โดยมีจุดมุ่งหมายให้การลงทุนได้รับผลตอบแทนที่ดีสุด ภายใต้กรอบความเสี่ยงที่ผู้ลงทุนยอมรับได้และยังเป็นเสมือนหนึ่งเครื่องมือในการลงทุนของผู้ลงทุน เมื่อการลงทุนในตลาดหลักทรัพย์เพิ่มสูงขึ้น สถาบันการเงินหรือบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุน (บลจ.) จึงเข้ามามีบทบาทความสำคัญในการซื้อขายหลักทรัพย์ในตลาดหลักทรัพย์ฯ มากขึ้น ความรู้ความเข้าใจ จะช่วยให้นักลงทุนสามารถเลือกทางเลือกการลงทุนที่เหมาะสมกับความเสี่ยงและผลตอบแทนที่ต้องการได้ (สถาบันพัฒนาความรู้ตลาดทุน ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย, 2548.)

(จิรัตน์, 2540) ความเสี่ยงจากการลงทุนในหลักทรัพย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ความเสี่ยงที่เป็นระบบ (systematic Risk)คือ การเปลี่ยนแปลงของผลตอบแทนจากการลงทุนในหลักทรัพย์ที่เปลี่ยนแปลงไปที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพ แวดล้อมภายนอกของธุรกิจ ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้และมีผลกระทบต่อราคาหลักทรัพย์ในตลาดทั้งหมด ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะทำให้ราคาหลักทรัพย์โดยทั่วไปเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน และ ความเสี่ยงที่ไม่เป็นระบบ (Unsystematic Risk) คือ ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นเฉพาะกิจการหนึ่ง หรืออุตสาหกรรมใดอุตสาหกรรมหนึ่ง ซึ่งเมื่อเกิดเหตุการณ์นี้แล้วจะมีผลกระทบต่อราคาหลักทรัพย์ของธุรกิจนั้น ไม่มีผลกระทบต่อราคาหลักทรัพย์อื่นในตลาด(เพชรี, 2540) จะเห็นได้ว่าการลงทุนที่มีความเสี่ยงต่ำผลตอบแทนก็จะอยู่อยู่ในระดับต่ำ เช่นเดียวกับการลงทุนความเสี่ยงที่สูงผลตอบแทนก็จะสูงตามไปด้วย ดังนั้นกองทุนรวมจึงเป็นเครื่องมือการลงทุนที่มีประสิทธิภาพ ที่จะทำให้การลงทุนได้รับผลตอบแทนที่ดีที่สุด ภายใต้กรอบความเสี่ยงที่กำหนด เราจึงมุ่งเน้นศึกษาที่การลงทุนในความเสี่ยงต่ำประเภทของกองทุนรวมซึ่งเป็นกองทุนหุ้นระยะยาวและกองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ

ผลตอบแทนและความเสี่ยงจากการลงทุนในกองทุนรวมคือ ไม่รับประกันผลตอบแทนที่ผู้ลงทุนจะได้รับ (ยกเว้นกรณีของกองทุนรวมมีประกัน) ผู้ลงทุนอาจจะได้รับผลตอบแทน หรืออาจจะขาดทุนจากการขายหน่วยลงทุนก็ได้ เมื่อการลงทุนของกองทุนรวมมีกำไร ผู้ถือหน่วยลงทุนจะได้รับส่วนแบ่งกำไรในรูปของเงินปันผล (Dividend) (ในกรณีที่กองทุนรวมนั้นมีนโยบายที่จะจ่ายเงินปันผล) และมูลค่าทรัพย์สินสุทธิต่อหน่วยที่เพิ่มขึ้น ผู้ลงทุนก็จะได้รับกำไรส่วนเกินมูลค่าหน่วยลงทุน (Capital Gain) ส่วนความเสี่ยงของกองทุนรวมแต่ละประเภทนั้นมีความเสี่ยงในทำนองเดียวกันกับตราสารหรือหลักทรัพย์ ที่กองทุนรวมนั้น ๆ เน้นลงทุน เช่น กองทุนรวมตราสารทุนก็จะมีความเสี่ยงแบบเดียวกันความเสี่ยงของตราสารทุน กองทุนรวมตราสารหนี้ก็จะมีความสี่ยงแบบเดียวกับตราสารหนี้ เป็นต้น

โดยปัจจัยหลักที่ยากต่อการพยากรณ์อนาคตของตลาด คือจังหวะตลาด เพราะยากในการทำนายอนาคต ดังนั้นผู้จัดการกองทุนควรจะใช้วิธีการและรูปแบบที่แตกต่างกันในการวิเคราะห์เพื่อให้การลงทุนมีความเสี่ยงลดลงจากการประเมินผลการดำเนินงานกองทุนรวมของอุตสาหกรรม จากงานวิจัยของ (ชนาธิป, 2552) แสดงผลการศึกษาผลประกอบการกองทุนรวมเอาไว้ว่า เมื่อใช้วิธีการวัดผลการดำเนินงานของกองทุนรวม ผ่าน

วิธี Portfolio Change Measurement เปรียบเทียบกับการใช้วิธีการวัดผลการทำงานแบบ Treynor Index, Sharp Index และ Jensen Index วัดผลการดำเนินงานของกองทุนรวมตราสารทุนประเทศไทยในช่วงปี 2005-2008 พบว่า วิธี Portfolio Change Measurement นั้นไม่มี Corelation กับมาตรวัดตัวอื่น จึงสรุปว่าวิธี Portfolio Change Measurement เป็นวิธีที่ยังไม่เหมาะสมกับตรลาดกองทุนรวมในประเทศไทย เนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูลกองทุนรวมที่ยังคงมีน้อยเกินไป และจากงานวิจัยของ (Wei He and Bolong Cao., 2011) ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิของกองทุนรวมที่ลงทุนในหุ้นภายในประเทศจีน โดยทำการศึกษาความเสี่ยง การเข้าทำจังหวะตลาด และผลการดำเนินงานของกองทุนโดยทำการแยกการวิเคราะห์ตามกลยุทธ์การลงทุน และลักษณะการบริหารงาน พบว่าประสิทธิภาพของกองทุนนั้นจะขึ้นกับขนาดและอายุของกองทุนนั้น ซึ่งถ้ากองทุนมีอายุเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพอาจจะลดลงเพราะมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น มีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้การดำเนินงานมีความยากลำบาก แต่ในทางกลับกันถ้าผู้จัดการกองทุนมีประสบการณ์ที่มาก จะส่งผลให้ผลการดำเนินงานของกองทุนรวมมีค่าดีขึ้นด้วย

ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่ากองทุนรวมที่เป็น bank affiliate จะมีอัตราผลตอบแทนสูงกว่ากองทุนรวมที่เป็น non-bank affiliate และผลการดำเนินงานของกองทุนรวมที่เป็น bank affiliate จะดีกว่ากองทุนรวมที่เป็น non-bank affiliate ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกทำการศึกษารูปแบบการลงทุน ผลตอบแทน จังหวะตลาด ของกองทุนและผลการดำเนินงานของกองทุน รวมหุ้นระยะยาว (LTF) และกองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ (RMF) ที่บริหารโดยบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุนที่ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์และบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุนที่ไม่ได้ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์ เพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้ลงทุน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ระบบปฏิบัติการ Window 7
2. โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel 2010

วิธีการ

1. เก็บข้อมูลมูลค่าทรัพย์สินสุทธิ (NAV) ทุกวันสิ้นเดือน ช่วงเวลาที่ใช้ในการศึกษา คือ ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 ม.ค. 2548 ถึงวันที่ 31 ธ.ค. 2557 ย้อนหลัง 10 ปี โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น2 กลุ่ม คือ

a. กองทุนรวมหุ้นระยะยาว (LTF) และกองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ(RMF)ที่บริหารโดยบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุน ที่ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์ (bank affiliate)

b. กองทุนรวมหุ้นระยะยาว (LTF) และกองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ (RMF) ที่บริหารโดยบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุนที่ไม่ได้ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์ (non-bank affiliate)

2. วิเคราะห์ประสิทธิภาพการดำเนินงานของกองทุนรวมหุ้นระยะยาว (LTF) และกองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ (RMF) โดยใช้ทฤษฎีอัตราผลตอบแทน ทฤษฎีความเสี่ยง โดยใช้ Descriptive Statistics และมาตรวัดผลการดำเนินงานตามตัวแบบ CAPM model, Sharpe ratio และแบบจำลองของจังหวะเวลาการลงทุน Treynor and Mazuy (TM Model) ในการวิเคราะห์ข้อมูลและเปรียบเทียบผลการดำเนินงานของกองทุนทั้ง 2 โดยใช้ mean comparison

3. สรุปผลการศึกษาการผลการตอบแทนของกองทุนรวม ความเสี่ยงของกองทุนรวม และการเข้าจังหวะตลาดของผู้จัดการกองทุนรวมการเปรียบเทียบผลการดำเนินงานกับกองทุนกองทุนรวมหุ้นระยะยาว (LTF) และกองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ (RMF) ที่บริหารโดยบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุนที่บริหารโดยบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุนที่ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์และที่ไม่ได้ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์

สรุปข้อมูล

การแบ่งกลุ่มรูปแบบการลงทุน

Table1 : Investment Style vs. Fund Type

	Fund Type					
	Bank		non-Bank			
Investment Style	LTF	RMF	LTF	RMF	ETF	Total
Active	0	2	1	0	0	3
Aggressive Growth	2	0	6	2	0	10
Balance Funds	0	4	0	1	0	5
Growth	2	5	1	0	0	8
Income Fund	3	5	0	0	0	8
Index	1	1	1	0	8	11
Passive Index	0	2	0	0	0	2
Stable Fund	1	2	0	2	0	5
Stable growth	5	3	0	2	0	10
Stock	1	4	2	0	0	7
Value	0	2	0	1	0	3
Value Investment	6	3	2	1	0	12
Total	21	33	13	9	8	84

ตารางที่1 แสดงผลหลังจากการรวบรวมข้อมูลกองทุนรวมหุ้นระยะยาว (LTF) และกองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ(RMF)ที่บริหารโดยบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุนที่ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์และไม่ได้ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์ มีกองทุนรวมทั้งหมด 84 กองทุน แบ่งเป็น กองทุนรวมหุ้นระยะยาว ที่บริหารโดยบริษัทหลักทรัพย์จัดการกองทุนที่ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์ (bank affiliate LTF funds) 21 กองทุน, bank affiliate RMF funds 33 กองทุน, non-bank affiliate LTF funds 13 กองทุน และ non-bank affiliate LTF funds 9 กองทุน โดยได้ทำการจัดข้อมูลเป็นกลุ่มโดยแบ่งตามรูปแบบการลงทุน แบ่งออกได้เป็น 12 กลุ่ม พบว่า กองทุนที่ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์ (Bank) มีรูปแบบการลงทุนที่หลากหลายเน้นการเจริญเติบโตของกองทุน และเน้นการลงทุนที่มีผลตอบแทนสูง (Income Fund) ส่วนกองทุนที่ไม่ได้ถือหุ้นใหญ่โดยธนาคารพาณิชย์(Non-Bank) ก็มีรูปแบบการลงทุนที่หลากหลาย โดย 50 เปอร์เซ็นต์ของกองทุน non-bank affiliate LTF จะเน้นการเติบโตแบบก้าวกระโดด (Aggressive Growth)เน้นการทำกำไรเพื่อให้เป็นที่น่าสนใจแก่นักลงทุน

ข้อมูลปีเริ่มต้นของกองทุน

Table 2.1: Number of bank affiliate LTF funds Started from 2005-2014

Start Years	No.	Percent	Cum.Pct
<2005	13	61.90	61.90
2006	1	4.76	66.67
2007	7	33.33	100.00
Total	21	100.00	

Table 2.2: Number of non-bank affiliate LTF funds Started from 2005-2014

Start Years	No.	Percent	Cum.Pct
<2005	7	53.85	53.85
2006	0	0.00	53.85
2007	6	46.15	100.00
Total	13	100.00	

Table 2.3: Number of bank affiliate RMF funds Started from 2005-2014

Start Years	No.	Percent	Cum.Pct
<2005	11	33.33	33.33
2006	4	12.12	45.45
2007	1	3.03	48.48
2008	1	3.03	51.52
2009	1	3.03	54.55
2010	0	0.00	54.55
2011	1	3.03	57.58
2012	5	15.15	72.73
2013	4	12.12	84.85
2014	5	15.15	100.00
Total	33	100.00	

Table 2.4: Number of non-bank affiliate RMF funds Started from 2005-2014

Start Years	No.	Percent	Cum.Pct
<2005	5	55.56	55.56
2006	0	0.00	55.56
2007	0	0.00	55.56
2008	0	0.00	55.56
2009	1	11.11	66.67
2010	0	0.00	66.67
2011	1	11.11	77.78
2012	1	11.11	88.89
2013	0	0.00	88.89
2014	1	11.11	100.00
Total	9	100.00	

จากตารางที่ 2.1 และ 2.2 แสดงปีเริ่มต้นของ bank affiliate LTF และ non-bank affiliate LTF จะเห็นได้ว่าLTF ทั้งหมดจะเกิดก่อนปี 2008 ส่วนใหญ่จะเริ่มกองทุนมาเกิน 10 ปีเป็นกองทุนเก่า ส่วนตาราง 2.3 และ 2.4 แสดงปีเริ่มต้นของกองทุน bank affiliate RMF และ non-bank affiliate RMF จะเห็นได้ว่ามีกองทุนทยอยเกิดใหม่เพิ่มมากขึ้น และกองทุนในกลุ่ม Bank มากกว่า non-bank 2-3 เท่า ซึ่งส่วนใหญ่กองทุน LTF จะเกิดมานานแล้ว และกองทุน RMF ทยอยเกิดใหม่เรื่อยๆ สาเหตุที่นำปีที่เกิดมาวิเคราะห์คือเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ (Wei He and Bolong Cao., 2011) ได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกองทุนรวมที่ลงทุนในหุ้นในประเทศจีน พบว่าประสิทธิภาพของกองทุนนั้นจะขึ้นกับขนาดและอายุของกองทุน ซึ่งถ้ากองทุนมีอายุเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพอาจจะลดลงเพราะมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น มีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้การดำเนินงานมีความยากลำบาก แต่ในทางกลับกันถ้าผู้จัดการกองทุนมีประสบการณ์ที่มาก จะส่งผลให้ผลการดำเนินงานของกองทุนรวมมีค่าดีขึ้นด้วย

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทำ Descriptive Statistics

Table 3.1: Descriptive Statistics for bank affiliate LTF funds Characteristics

	N	mean	min	max	sd
Management fee	21	1.334	0.800	2.140	0.457
Fund age	21	9.76	8.00	11.00	1.375
Fund size[1]	21	5,790	109	29,138	8213
Growth rate	21	0.232	-0.297	0.739	0.226

Note1: Size in MB

Table 3.2: Descriptive Statistics for non-bank affiliate LTF funds Characteristics

	N	mean	min	max	sd
Management fee	13	1.565	1.000	1.820	0.222
Fund age	13	9.46	8.00	11.00	1.450
Fund size[1]	13	345.6	27.56	1,997	514.5
Growth rate	13	0.166	-0.243	1.091	0.386

Note1: Size in MB

Table 3.3: Descriptive Statistics for bank affiliate RMF funds Characteristics

	N	mean	min	max	sd
Management fee	28	1.366	0.27	2.18	0.494
Fund age	28	7.5	1	14	4.517
Fund size[1]	28	1,961	21.44	12,427	2765.9
Growth rate	28	0.247	0.000	1.228	0.287

Note1: Size in MB

Table 3.4: Descriptive Statistics for non-bank affiliate RMF funds Characteristics

	N	mean	min	max	sd
Management fee	9	1.618	1.01	2.17	0.377
Fund age	9	7.44	1.00	14.00	4.825
Fund size[1]	9	669.4	3.19	4,153	1420.9
Growth rate	9	0.114	-0.220	0.399	0.190

Note 1: Size in MB

จากตารางที่3 แสดงผลการทำ Descriptive Statistics จะเห็นได้ว่าขนาดของกองทุน (Fund size) ของ bank affiliate LTF มีขนาดใหญ่กว่า non-bank affiliate LTF เกือบ 20 เท่า และขนาดของ bank affiliate RMF มีขนาดใหญ่กว่า non-bank affiliate RMF ถึง 3 เท่า ค่าธรรมเนียมการดำเนินงาน (Management fee) ของ non-bank affiliate จะมากกว่าเป็นเพราะขนาดกองทุน มีขนาดเล็กกว่า bank affiliate ทำให้มีค่าการจัดการค่อนข้างสูงกว่า ในตอนแรกผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่ากองทุนที่มีค่าธรรมเนียมสูง(non-Bank)แสดงว่าผลการดำเนินงานดีกว่ากองทุนที่ค่าธรรมเนียมต่ำ(Bank) จึงคิดค่าธรรมเนียมแพงกว่าได้ แต่จากการวิเคราะห์พบว่าผลการดำเนินงานไม่ต่างกันมากนักทำให้ทราบว่า สาเหตุที่ค่าธรรมเนียมสูงกว่าเนื่องจากตัวหารคือขนาดกองทุนของ non-bank เล็กกว่าจึงต้องเก็บแพงกว่า ด้วยเหตุนี้ผู้จัดการกองทุน(ก.ล.ต.) จึงมีการสนับสนุน non-bank affiliate ให้เติบโตมากขึ้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการจัดการลง โดย ส่วนค่า growth rate วิเคราะห์จาก return ของ Fund size คิดจากปี 2013-2014 พบว่า growth rate ของกองทุนที่เป็น bank affiliate มีค่ามากกว่า เป็นความได้เปรียบด้านสาขาในการกระจายสินค้า

ผลจากการวิเคราะห์ด้วย CAPM Model และ Sharpe ratio

Table 4.1.1: Performance and Risk Measures in CAPM and Sharpe Ratio of bank affiliate LTF funds 01/01/2005- 31/12/2014

	N	mean	min	max	sd	N+	N+*	N-	N-*
Sharpe ratio	21	0.094	-0.084	0.201	0.071				
Alpha	21	0.000	-0.006	0.007	0.003	13	4	8	2
Beta	21	0.810	-1.001	1.047	0.445	20	20	1	1
Adjusted R^2	21	0.893	0.576	0.981	0.084				

Note: * indicate significance at 5 percent levels

Table 4.1.2: Performance and Risk Measures in CAPM and Sharpe Ratio of non-bank affiliate LTF funds 01/01/2005 - 31/12/2014

	N	mean	min	max	sd	N+	N+*	N-	N-*
Sharpe ratio	13	0.093	-0.132	0.168	0.081				
Alpha	13	0.001	-0.006	0.004	0.003	9	2	4	1
Beta	13	0.839	-0.012	1.008	0.271	12	12	1	0
Adjusted R^2	13	0.807	0.000	0.969	0.252				

Note: * indicate significance at 5 percent levels

Table 4.1.3: Performance and Risk Measures in CAPM and Sharpe Ratio of bank affiliate RMF funds 01/01/2005 - 31/12/2014

	N	mean	min	max	sd	N+	N+*	N-	N-*
Sharpe ratio	28	0.096	-0.573	0.265	0.163				
Alpha	28	0.002	-0.007	0.009	0.004	23	6	5	0
Beta	28	0.841	0.155	1.317	0.277	28	27	0	0
Adjusted R^2	28	0.770	-0.004	0.987	0.280				

Note: * indicate significance at 5 percent levels

Table 4.1.4: Performance and Risk Measures in CAPM and Sharpe Ratio of non-bank affiliate RMF funds 01/01/2005- 31/12/2014

	N	mean	min	max	sd	N+	N+*	N-	N-*
Sharpe ratio	9	0.038	-0.777	0.254	0.331				
Alpha	9	0.000	-0.021	0.008	0.009	7	1	2	0
Beta	9	0.628	0.202	0.974	0.284	9	1	0	0
Adjusted R^2	9	0.605	0.036	0.937	0.303				

Note: * indicate significance at 5 percent levels

จากตารางที่ 4.1 ในการวัดอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน เมื่อเทียบกับความเสี่ยงโดยใช้ Sharpe ratio พบว่าค่าของ bank, non-bank affiliate LTF และ bank affiliate RMF มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน คือ 0.09 มากกว่าของ non-bank affiliate RMF คือ 0.038 ต่อมาคือผลตอบแทนส่วนเกิน (alpha)ของทุกกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกับตลาด และมีค่าเป็นบวกทุกกลุ่มไม่น้อยกว่าตลาด มีผลตอบแทนส่วนเกินเล็กน้อย และพบว่าความเสี่ยง(Beta) ของทุกกลุ่มมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการขึ้นลงจะน้อยกว่าตลาด และ จากค่า Adjusted R^2 แสดง

ความน่าเชื่อถือของ Model พบว่าสามารถเชื่อถือได้ค่อนข้างมากประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการวิเคราะห์จังหวะเวลาการลงทุน (Market Timing) ด้วย Treynor and Mazuy (TM) Model

Table 4.2.1: Performance and Risk Measures in TM Model of bank affiliate LTF funds 01/01/2005- 31/12/2014

	N	mean	min	max	sd	N+	N+*	N-	N-*
Alpha	21	-0.001	-0.004	0.005	0.002	6	2	15	0
Beta	21	0.825	-0.942	1.094	0.441	20	20	1	1
TM Timing	21	0.283	-0.635	1.963	0.500	18	2	3	1
Adjusted R^2	21	0.895	0.579	0.981	0.083				

Note: * indicate significance at 5 percent levels

Table 4.2.2: Performance and Risk Measures in TM Model of non-bank affiliate LTF funds 01/01/2005- 31/12/2014

	N	mean	min	max	sd	N+	N+*	N-	N-*
Alpha	13	0.000	-0.007	0.005	0.003	6	1	7	1
Beta	13	0.850	-0.024	1.020	0.282	12	12	1	1
TM Timing	13	0.175	-0.459	0.722	0.351	9	4	4	2
Adjusted R^2	13	0.811	0.035	0.969	0.244				

Note: * indicate significance at 5 percent levels

Table 4.2.3: Performance and Risk Measures in TM Model of bank affiliate RMF funds 01/01/2005- 31/12/2014

	N	mean	min	max	sd	N+	N+*	N-	N-*
Alpha	28	0.002	-0.011	0.015	0.005	20	3	8	0
Beta	28	0.838	0.178	1.379	0.286	28	27	0	0
TM Timing	28	-0.207	-3.266	3.408	1.542	16	2	12	0
Adjusted R^2	28	0.765	-0.115	0.988	0.293				

Note: * indicate significance at 5 percent levels

Table 4.2.4: Performance and Risk Measures in TM Model of non-bank affiliate RMF funds 01/01/2005- 31/12/2014

	N	mean	min	max	sd	N+	N+*	N-	N-*
Alpha	9	0.001	-0.021	0.007	0.009	7	1	2	0
Beta	9	0.617	0.217	0.970	0.285	9	8	0	0
TM Timing	9	-0.652	-2.073	0.229	0.844	2	0	7	0
Adjusted R^2	9	0.577	0.029	0.937	0.325				

Note: * indicate significance at 5 percent levels

จากตารางที่ 4.2 วิเคราะห์จังหวะเวลาการลงทุน (Market Timing) ด้วย Treynor and Mazuy (TM) Model ได้ว่า ค่าเฉลี่ย TM Timing ของ LTF ทั้งสองกลุ่มมีค่าเป็นบวกไม่ต่างกันมากนัก โดยของ bank affiliate LTF มีกองที่เป็นบวกถึง 90 เปอร์เซ็นต์ และ ของnon-bank affiliate LTF มีกองที่เป็นบวก 60 เปอร์เซ็นต์ ส่วน TM

Timing ของ RMF ทั้งสองกลุ่มมีค่าเฉลี่ยติดลบ โดยของnon-bank affiliate RMF funds มีกองที่ติดลบถึง 75 เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงกลุ่ม RMF ยังจับจังหวะการเข้าตลาดได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับกลุ่ม LTF ทั้งสองกลุ่ม ส่วนในด้านผลตอบแทนส่วนเกิน ทุกกลุ่มเป็นบวกมีผลตอบแทนส่วนเกินใกล้เคียงกับตลาดยกเว้น bank affiliate LTF funds ติดลบเพียงเล็กน้อยคือ -0.001 ผลตอบแทนส่วนเกินเกือบเท่ากับตลาด และพบว่าความเสี่ยง(Beta) ของทุกกลุ่มมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 1 แสดงถึงการขึ้นลงจะเบากว่าตลาด และจากค่า Adjusted R^2 พบว่า model มีความน่าเชื่อถือประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์

จากการเปรียบเทียบผลการดำเนินงานของกองทุน Bank และ non-Bank โดยวิธี mean comparison พบว่า ค่าSharpe ratio,Fund age, Management fee,CAPM และ TM Timing ของ bank และ non-bank ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่า Fund size ของ bank และ non-bank แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

สรุป

ในการวัดอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน เมื่อเทียบกับความเสี่ยงโดยใช้ Sharpe ratio พบว่าค่าของ bank affiliate LTF, non-bank affiliate LTF และ bank affiliate RMF มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน คือ 0.09 มากกว่าของ non-bank affiliate RMF funds คือ 0.038 สรุปได้ว่ากองทุนแต่ละกลุ่มมีผลตอบแทนใกล้เคียงกัน

ผลตอบแทนส่วนเกิน ของทุกกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกับตลาด และมีค่าเป็นบวกทุกกลุ่มไม่น้อยกว่าตลาด มีผลตอบแทนส่วนเกินเล็กน้อยยกเว้น bank affiliate LTF ติดลบเพียงเล็กน้อยคือ -0.001 ผลตอบแทนส่วนเกินเกือบเท่ากับตลาด ความเสี่ยง(Beta) ของทุกกลุ่มมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการขึ้นลงจะน้อยกว่าตลาด

จังหวะเวลาการลงทุน ค่าเฉลี่ย TM Timing ของ LTF ทั้งสองกลุ่มมีค่าเฉลี่ยเป็นบวกใกล้เคียงกัน ส่วน TM Timing ของ RMF ทั้งสองกลุ่มมีค่าเฉลี่ยติดลบ แสดงถึงกลุ่ม RMF ยังจับจังหวะการเข้าตลาดได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับกลุ่ม LTF ทั้งสองกลุ่ม

จากงานวิจัยของ (Wei He and Bolong Cao., 2011) พบว่าประสิทธิภาพของกองทุนนั้นจะขึ้นกับขนาดและอายุของกองทุน ซึ่งถ้ากองทุนมีอายุเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพอาจจะลดลงเพราะมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น มีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้การดำเนินงานมีความยากลำบาก แต่ในงานวิจัยนี้พบว่าผลการดำเนินงานทั้ง Bank และ Non-bank affiliate ใกล้เคียงไม่ต่างกันมากนัก แต่ค่าธรรมเนียมการจัดการของ Non-bank affiliate มีค่าสูงกว่าอาจเนื่องมาจากมีขนาดกองทุนที่เล็กกว่า และเสียเปรียบด้านสาขาในการกระจายสินค้า ดังนั้น ผู้จัดการกองทุนจึงควรมีนโยบายกระตุ้นให้มีการขยายตัวของกลุ่ม Non-bank affiliate มากขึ้นเพื่อให้ค่าธรรมเนียมการจัดการต่ำลง และยังเป็นทางเลือกแก่นักลงทุนด้วย

ประโยชน์ของการทำวิจัยนี้คือ 1. ทำให้ทราบผลการดำเนินงานของกองทุนรวมหุ้นระยะยาว (LTF) และกองทุนรวมเพื่อการเลี้ยงชีพ (RMF) ของ Bank affiliate และ Non-bank affiliate เพื่อใช้ในการตัดสินใจในการเลือกลงทุน 2.สามารถลดความเสี่ยงจากการลงทุนในกองทุนรวมได้ 3.เพื่อให้นักลงทุนใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจพิจารณาเลือกลงทุน

เอกสารอ้างอิง

เพชรี ขุมทรัพย์. 2541. **หลักการลงทุน**. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

จิรัตน์ สังข์แก้ว. 2540. **การลงทุน**. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ชนาธิป ภูมิหิรัญ. 2550. **Performance measurement without benchmark : a case of Thaimutual funds**. งานศึกษาอิสระปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี, การเงิน.

สถาบันพัฒนาความรู้ตลาดทุน ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย 2548. **การลงทุนในกองทุน**. ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ .

Wei He and Bolong Cao. 2011. **The Performance of Chinese Open-End Stock Mutual Funds: A First Look.** Source: // http://ssrn.com/abstract=1927724, June 2, 2015

การวิเคราะห์สารระเหยให้กลิ่นในกลิ่นกะทิกลั่นระเหย

Identification of Volatile Aroma Compounds in Evaporated Coconut Milk Flavoring

ณัฐณิชา กุลนานันท์[1] ภควรรณ มีศิริ[1] ธัญชนก ชำนิไพบูลย์[1] มยุรา บุตรภักดี[1] และ เยาวภา หล่อเจริญผล[1*]

Natnicha Kullananant[1], Pakawan Meesiri[1], Thanchanok Chamnipaiboon[1], Mayura Butpakdee[1] and Yaowapa Lorjaroenphon[1*]

บทคัดย่อ

กลิ่นกะทิกลั่นระเหย (EF) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ที่กลั่นได้จากกะทิ (CM) เนื้อมะพร้าวขูด (SC) หรือกากมะพร้าว (CC) ด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุนที่ความดัน 72 มิลลิบาร์ (60 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งพบว่าส่วนที่กลั่นได้จากทั้ง 3 ตัวอย่างมีกลิ่นกะทิที่ดีชัดเจน และเมื่อวิเคราะห์สารระเหยด้วยเทคนิค headspace-solid phase microextraction (HS-SPME) ร่วมกับ gas chromatography-time of flight mass spectrometry (GC-TOFMS) พบว่า 2-butanone และ 2-ethyl-1-hexanol เป็นสารระเหยที่มีปริมาณมากที่สุดใน EF ทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยพบสารระเหยให้กลิ่น 33 ชนิดใน EF-CM ในขณะที่ EF-SC และ EF-CC พบเพียง 30 และ 25 ชนิดตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสให้คะแนนความเข้มของกลิ่นกะทิไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ดังนั้นกากมะพร้าวที่เหลือทิ้งจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตกลิ่นกะทิกลั่นระเหยเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในอาหารได้

ABSTRACT

Evaporated coconut milk flavoring (EF) is colorless transparent liquid condensed from coconut milk (CM), shredded coconut (SC) or coconut cake (CC) by using rotary evaporator at 72 mbar (60 °C) for 30 min. Good coconut milk aroma was observed from all EF samples. The volatile aroma components were also identified by headspace-solid phase microextraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography-time of flight mass spectrometry (GC-TOFMS). 2-Butanone and 2-ethyl-1-hexanol were the major volatile compounds in the EF samples. There were 33 volatiles found in EF-CM, while EF-SC and EF-CC contained only 30 and 25 compounds, respectively. However, the intensities of coconut milk aroma rated by sensory panel were not significantly different (p>0.05). This study revealed utilization of coconut cake to produce evaporated coconut milk flavoring as food ingredient.

Key Words: volatile, aroma, evaporated coconut milk flavoring, gas chromatography-time of flight mass spectrometry

*Corresponding author; e-mail address: **fagiypl@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University

คำนำ

กะทิเป็นอิมัลชันสีขาวขุ่นชนิดน้ำมันในน้ำที่ได้จากการคั้นเนื้อมะพร้าวขูด มีกลิ่นรสหอมหวานที่เป็นเอกลักษณ์โดดเด่น เป็นที่นิยมบริโภคทั่วโลก โดยใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารคาวและหวานหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามมีผู้บริโภคจำนวนหนึ่งหลีกเลี่ยงการบริโภคอาหารที่มีกะทิเป็นส่วนผสม เนื่องจากกังวลถึงกรดไขมันอิ่มตัวซึ่งเป็นองค์ประกอบในกะทิที่อาจส่งผลต่อระดับคอเลสเตอรอลชนิด low density lipoprotein (LDL) โดยเฉพาะผู้ที่เป็นโรคในกลุ่มเสี่ยง เช่น โรคหัวใจ โรคไขมันหรือคอเลสเตอรอลในเส้นเลือดสูง โรคความดันโลหิตสูง และโรคอ้วน เป็นต้น การพัฒนาสารปรุงแต่งกลิ่นรสกะทิจากธรรมชาติจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพซึ่งไม่ต้องการรับประทานอาหารที่มีกะทิโดยตรงและไม่ใช้วัตถุปรุงแต่งกลิ่นรสสังเคราะห์ นอกจากนี้ประเทศไทยยังเป็นผู้ส่งออกกะทิอันดับ 1 โดยคิดเป็น 80% ของส่วนแบ่งตลาดทั่วโลก (สถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม, 2555) การใช้ประโยชน์กากมะพร้าวจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกะทิจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับส่วนเหลือทิ้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการเตรียมกลิ่นกะทิกลั่นระเหย (EF) จากกะทิ (CM) เนื้อมะพร้าวขูด (SC) และกากมะพร้าว (CC) ด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารปรุงแต่งกลิ่นรสธรรมชาติ (natural flavoring) สำหรับอาหารที่ไม่ต้องการใช้กะทิโดยตรงและไม่ต้องการใช้กลิ่นรสสังเคราะห์ (artificial flavoring) โดยเปรียบเทียบคุณภาพของ EF-CC กับตัวอย่าง EF-CM และ EF-SC ด้วยวิธีทางเคมีและทางประสาทสัมผัส เพื่อเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์จากส่วนเหลือทิ้งสำหรับอุตสาหกรรมอาหารให้อนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบ

ซื้อวัตถุดิบ 1) กะทิคั้นสดด้วยเครื่องทางการค้าโดยใช้เนื้อมะพร้าวขูดขาวไม่ผสมน้ำ 2) เนื้อมะพร้าวขูดขาว และ 3) กากมะพร้าวที่เหลือจากการคั้นกะทิ จากตลาดสดอมรพันธ์ บางเขน กรุงเทพฯ แล้วทำการวิเคราะห์และเตรียมตัวอย่างทันทีเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงหรือการเกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์

2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมันและความชื้นในวัตถุดิบ

วิเคราะห์ไขมันในกะทิด้วยวิธี Babcock-Gerber โดยเจือจางกะทิด้วยน้ำกลั่นและใช้ขวด Babcock ที่อ่านค่าไขมันได้ในช่วง 0-50% วิเคราะห์ความชื้นในเนื้อมะพร้าวขูดและกากมะพร้าวด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณความชื้นระบบอินฟาเรดรุ่น MLB (KERN, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำทุกตัวอย่าง

3. การเตรียมกลิ่นกะทิกลั่นระเหย

เติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ 300 กรัม และโซเดียมเบนโซเอต 7.5 กรัม ในวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ 1) กะทิ 1,500 กรัม 2) เนื้อมะพร้าวขูด 750 กรัม ผสมน้ำกลั่น 750 กรัม และ 3) กากมะพร้าว 750 กรัม ผสมน้ำกลั่น 750 กรัม ผสมให้เข้ากันและใช้เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Buchi, Switzerland) ที่ความดัน 72 มิลลิบาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วเก็บของเหลวใสส่วนที่กลั่นได้มาคำนวณค่า yield (%) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างน้ำหนักของกลิ่นกะทิกลั่นระเหยที่ได้กับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ก่อนวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS แล้วเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Tukey's HSD test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4. การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารระเหยให้กลิ่น

สกัดสารระเหยให้กลิ่นในตัวอย่างกลิ่นกะทิกลั่นระเหยตามวิธีที่ดัดแปลงจาก Lorjaroenphon and Cadwallader (2015) โดยชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ในขวดแก้ว vial ขนาด 20 มิลลิลิตร เติมสารละลายมาตรฐานสำหรับใช้วิเคราะห์ปริมาณสัมพัทธ์ 50 นาโนกรัม/กรัมตัวอย่าง (2-methyl-3-heptanone เข้มข้น 10.52 มิลลิกรัม/เมทานอล 10 มิลลิลิตร) และโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัม ปิดฝาให้สนิทก่อนนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที โดยมีการกวนตัวอย่างที่ความเร็ว 250 รอบ/นาที แล้วสกัดสารระเหยบริเวณเหนือตัวอย่าง (headspace; HS) ด้วยไฟเบอร์ของ solid phase microextraction (SPME) ชนิด DVB/CAR/PDMS (Supelco®, US) ขนาด 50/30 ไมโครเมตร เป็นเวลา 20 นาทีที่สภาวะเดียวกันกับการบ่ม จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatography (GC) (รุ่น 7890A; Agilent Technologies, US) ที่ต่อกับ time of flight mass spectrometry (TOFMS) (รุ่น Pegasus 4D; LECO®, US) ตามวิธีที่ดัดแปลงจาก Kabir and Lorjaroenphon (2014) คือใช้สภาวะของเครื่องแบบ splitless มีฮีเลียมเป็นก๊าซตัวพาที่อัตราไหลคงที่ 1 มิลลิลิตร/นาที โดยแยกสารระเหยด้วยแคปิลารีคอลัมน์ชนิด Stabilwax® ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ชั้นเคลือบหนา 0.25 ไมโครเมตร (Restek®, US) อุณหภูมิตู้อบเริ่มต้นที่ 40 องศาเซลเซียส คงไว้เป็นเวลา 5 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 240 องศาเซลเซียส และคงไว้เป็นเวลา 10 นาที

วิเคราะห์ชนิดของสารระเหย โดยนำข้อมูล mass spectrum ของสารแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล National Institute of Standards and Technology 2011 (NIST 2011) ร่วมกับการเปรียบเทียบค่า retention index (RI) ของสารแต่ละชนิดกับเอกสารอ้างอิงที่ใช้คอลัมน์ชนิดเดียวกัน ซึ่งค่า RI นี้คำนวณได้จากค่า retention time (RT) ของสารแต่ละชนิดกับค่า RT ของสารมาตรฐาน *n*-alkanes (C_6-C_{26}, C_{28}, C_{30}) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยคอลัมน์และสภาวะการวิเคราะห์เดียวกันกับตัวอย่าง

คำนวณปริมาณสัมพัทธ์ (นาโนกรัม/กรัมตัวอย่าง) ของสารระเหยโดยหาพื้นที่ใต้พีคของสารแต่ละชนิดด้วยโปรแกรม ChromaTOF® version 4.50.8.0 (LECO®, US) แล้วเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐานสำหรับใช้วิเคราะห์ปริมาณสัมพัทธ์

5. การทดสอบทางประสาทสัมผัส

นำตัวอย่างที่กลั่นได้มาวิเคราะห์คุณภาพด้านความเข้มของกลิ่นกะทิโดยรวมด้วยการทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ rating test ตามวิธีของ Meilgaard *et al*. (2007) โดย 1 = ไม่มีกลิ่นกะทิ 2 = มีกลิ่นกะทิเล็กน้อย 3 = มีกลิ่นกะทิปานกลาง 4 = มีกลิ่นกะทิมาก 5 = มีกลิ่นกะทิมากที่สุด ใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนสำหรับการหาความแตกต่าง (different test) จำนวน 18 คน (อายุระหว่าง 19-22 ปี) วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยวิธีเดียวกับการทดลองในข้อ 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์คุณภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบพบว่ากะทิมีปริมาณไขมันเฉลี่ย 30.50% ซึ่งน้อยกว่าผลจากงานวิจัยของ Seow and Gwee (1997) ที่มีค่าในช่วง 32.20-40.00% ทั้งนี้อาจเนื่องจากมะพร้าวที่ใช้มาจากพื้นที่ปลูกต่างกันจึงส่งผลต่อองค์ประกอบของกะทิที่คั้นได้ สำหรับเนื้อมะพร้าวขูดขาวมีปริมาณความชื้นเฉลี่ย 51.50% ซึ่งใกล้เคียงกับ United States Department of Agriculture (n.d.) ที่รายงานว่าเนื้อมะพร้าวแก่มีความชื้น 46.99% ส่วนกากมะพร้าวมีความชื้นเฉลี่ย 47.32% สอดคล้องกับผลจากการทดลองของกานต์ และ

คณะ (2555) ที่พบความชื้น 52.69% ในกากมะพร้าวจากการบีบกะทิโดยใช้อัตราส่วนเนื้อมะพร้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก

กลิ่นกะทิกลั่นระเหยที่ได้จากการเตรียมด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุนมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี และมีกลิ่นโดยรวมของกะทิอย่างชัดเจน โดยเมื่อเปรียบเทียบทั้งสามตัวอย่าง พบว่า yield ของ EF-SC (18.57 ± 1.81) มีค่าสูงกว่า EF-CC (12.03 ± 0.88) และ EF-CM (11.92 ± 0.82) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อทำการวิเคราะห์สารระเหยในตัวอย่างกลิ่นกะทิกลั่นระเหยด้วยเทคนิค HS-SPME ร่วมกับ GC-TOFMS พบสารระเหยให้กลิ่นในกลุ่ม alcohol, aldehyde, ester, ketone, lactone, terpene และ sulfur containing compound ทั้งสิ้น 33 ชนิด (Table 1) ซึ่งเคยมีรายงานการตรวจพบในผลิตภัณฑ์กะทิสดและกะทิกระป๋อง (*ศุภศิริ*, 2550; Tinchan, 2014; Tinchan *et al*., 2015) ยกเว้น toluene, 3-heptanone, linalool, acetophenone, naphthalene, 2-methyl-butyl-propanoate และ benzyl benzoate ที่ตรวจพบในอาหารชนิดอื่น (Leffingwell, 2004; Acree and Arn, 2004) โดย EF-CM เป็นตัวอย่างที่พบสารระเหยให้กลิ่นทั้ง 33 ชนิด ในขณะที่ EF-SC และ EF-CC พบสารระเหยให้กลิ่นเพียง 30 และ 25 ชนิดตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นสัมพัทธ์พบว่า 2-butanone (sweet, solvent, acetone-like, ketonic) และ 2-ethyl-1-hexanol (rose, green) เป็นสารระเหยให้กลิ่นที่มีปริมาณมากที่สุดในตัวอย่าง EF ที่เตรียมจากวัตถุดิบทั้งสามชนิด นอกจากนี้ 3-hydroxy-2-butanone (butter, cream) รวมถึง delta-octalactone (peach, coconut) และ 1-octanol (chemical, metal, burnt) ซึ่งพบใน EF ยังสอดคล้องกับที่พบปริมาณสูงในกะทิกระป๋อง (Tinchan *et al*., 2015) และเนื้อมะพร้าว (Lin and Wilkens, 1970) อีกด้วย อย่างไรก็ตาม octanoic acid และ ethyl octanoate ซึ่งเป็นสารระเหยหลักที่พบในกะทิกระป๋อง (Tinchan *et al*., 2015) รวมถึง delta-decalactone ที่มีปริมาณสูงในเนื้อมะพร้าว (Lin and Wilkens, 1970) กลับไม่พบในตัวอย่าง EF ที่เตรียมได้จากการทดลองนี้

และเมื่อพิจารณาค่า odor activity value (OAV) ที่ได้จากการคำนวณสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารระเหยกับค่า odor detection threshold ในน้ำที่รายงานในงานวิจัยต่าง ๆ พบว่า octanal (fat, soap, lemon, green), nonanal (fat, citrus, green) และ decanal (green, soapy, orange peel) เป็นสารระเหยให้กลิ่นที่มีค่า OAV มากกว่า 1 ใน EF ทั้งสามชนิด (Table 2) ซึ่งแสดงว่าเป็นสารให้กลิ่นสำคัญในตัวอย่างดังกล่าว นอกจากนี้ ethyl acetate (pineapple) ยังเป็นสารให้กลิ่นสำคัญที่พบใน EF-CM อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากสารดังกล่าวทั้งหมดมีค่า threshold ต่ำ ในขณะที่ 2-butanone และ 2-ethyl-1-hexanol ซึ่งเป็นสารระเหยหลักในตัวอย่าง EF กลับมีค่า OAV น้อยกว่า 1 เพราะสารระเหยทั้งสองมีค่า threshold สูง เช่นเดียวกับ 3-hydroxy-2-butanone, 1-octanol และ delta-octalactone ซึ่งเป็นสารระเหยหลักในกะทิกระป๋องและเนื้อมะพร้าว (Tinchan *et al*., 2015; Lin and Wilkens, 1970)

เมื่อทดสอบทางประสาทสัมผัสของตัวอย่าง EF โดยวิธี rating test ซึ่งใช้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 18 คน พบว่า EF-CM, EF-SC และ EF-CC ได้คะแนนความเข้มของกลิ่นกะทิโดยรวม 3.13, 2.93 และ 2.37 ตามลำดับ (Table 3) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามมีผู้ทดสอบจำนวนหนึ่งแสดงความคิดเห็นว่าลักษณะกลิ่นที่ได้จาก EF-CM คล้ายนมเปรี้ยวเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลจาก 3-hydroxy-2-butanone (acetoin) ที่มีลักษณะกลิ่นของผลิตภัณฑ์นมและมีปริมาณใน EF-CM สูงกว่า

ตัวอย่างอื่น (Table 1) ในขณะที่ EF-CC มีลักษณะกลิ่นหอมหวาน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำส่วนเหลือทิ้งนี้มาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า

Table 1 Relative concentration of volatile aroma compounds in evaporated coconut milk flavoring

compound	odor description	RI[f]	relative concentration (ng/g)		
			coconut milk	shredded coconut	coconut cake
ethyl acetate[a]	pineapple[c]	<1103	4.87 ± 0.00	1.23 ± 0.77	2.78 ± 0.76
2-butanone[a]	sweet, solvent, ketonic[b]	<1103	271.38 ± 0.00	111.84 ± 13.88	81.96 ± 18.92
1-propanol[a]	alcohol, pungent[c]	<1103	0.92 ± 0.08	0.30 ± 0.20	0.68 ± 0.16
toluene	paint[c]	<1103	0.39 ± 0.13	0.75 ± 0.41	0.87 ± 0.42
hexanal[a]	grass, tallow, fat[c]	1109	0.84 ± 0.95	0.84 ± 0.50	2.12 ± 2.74
2-methyl-1-propanol[a]	wine, solvent, bitter[c]	1114	1.48 ± 0.49	0.80 ± 0.45	0.65 ± 0.01
1-butanol[a]	medicine, fruit[c]	1157	42.28 ± 33.51	22.25 ± 11.75	26.62 ± 26.11
3-heptanone	strong, fatty, green, fruit[b]	1170	0.23 ± 0.19	0.17 ± 0.10	0.36 ± 0.19
2-heptanone[a]	fruit, cheese, cinnamon[b]	1192	31.09 ± 9.68	18.31 ± 14.50	30.65 ± 2.01
3-methyl-1-butanol[a]	whiskey, malt, burnt[c]	1207	14.62 ± 6.97	5.07 ± 2.10	9.26 ± 1.12
limonene[a]	turpentine[b]	1225	2.42 ± 3.14	1.87 ±0.28	3.10 ± 1.88
3-hydroxy-2-butanone[a]	butter, cream[c]	1282	32.72 ± 28.48	5.42 ± 0.25	2.77 ± 0.04
octanal[a]	fat, soap, lemon, green[c]	1295	1.96 ± 2.20	1.30 ± 0.70	0.73 ± 16.13
2-heptanol[a]	green, lemon, herbaceous[b]	1315	16.50 ± 6.84	8.34 ± 8.02	15.47 ± 2.03
6-methyl-5-hepten-2-one[a]	oily-green, herbaceous[b]	1338	2.43 ± 1.64	1.75 ± 0.65	4.30 ± 7.84
1-hexanol[a]	resin, flower, green[c]	1350	22.76 ± 3.89	11.81 ± 6.26	16.50 ± 0.00
2-nonanone[a]	fruit, fatty-cheese[b]	1395	2.43 ± 1.66	1.91 ± 0.88	-
nonanal[a]	fat, citrus, green[c]	1401	17.26 ± 11.87	19.03 ± 9.90	15.25 ± 1.64
1-octen-3-ol[a]	raw mushroom[e]	1441	0.70 ± 0.17	0.70 ± 0.00	-
ethyl octanoate[a]	fruit, fat[c]	1451	35.91 ± 24.13	24.84 ± 7.46	14.48 ± 4.52
2-ethyl-1-hexanol[a]	rose, green[c]	1491	51.58 ± 41.64	46.18 ± 10.20	66.68 ± 19.23
decanal[a]	green, soapy, orange peel[d]	1508	5.48 ± 7.63	3.56 ± 4.08	14.53 ± 0.00
benzaldehyde[a]	almond, burnt sugar[c]	1523	5.94 ± 4.02	5.02 ± 0.62	26.10 ± 5.05
linalool	flower, lavender[c]	1535	2.36 ± 2.27	2.47 ± 1.48	3.00 ± 1.16
1-octanol[a]	chemical, metal, burnt[c]	1560	29.04 ± 14.54	24.24 ± 13.06	34.76 ± 10.65
acetophenone	must, flower, almond[c]	1648	2.49 ± 1.13	1.21 ± 0.74	5.47 ± 1.17
naphthalene	tar[c]	1741	2.14 ± 1.30	-	-
delta-hexalactone[a]	sweet[d]	1795	0.94 ± 0.24	0.33 ± 0.00	-
2-methyl-butyl-propanoate	strong, fruit[b]	>1799	4.42 ± 3.82	-	-
benzyl alcohol[a]	sweet, flower[c]	>1799	2.14 ± 0.27	0.27 ± 0.00	-
benzothiazole[a]	gasoline, rubber[c]	>1799	0.06 ± 0.01	-	-
delta-octalactone[a]	peach[c], coconut-like[d]	>1799	8.29 ± 3.72	2.06 ± 2.20	-
benzyl benzoate	balsamic, oil, herb[c]	>1799	0.94 ± 0.80	2.07 ± 0.50	3.96 ± 2.37

[a] Volatile aroma compound reported in fresh and canned coconut milk (ศุภศิริ, 2550; Tinchan, 2014; Tinchan *et al*., 2015)

[b-e] Odor description obtained from Leffingwell (2004), Acree and Arn (2004), Rychlik *et al*. (1998) and Widjaja *et al*. (1996), respectively

[f] Retention index (RI) obtained from Stabilwax® column

Table 2 Odor activity values of key volatile aroma compounds (OAV>1 or major components) in evaporated coconut milk flavoring

compound	odor threshold in water (ng/g)		OAV		
			coconut milk	shredded coconut	coconut cake
ethyl acetate	5	(Leffingwell, 2004)	1.0	<1	<1
2-butanone	50,000	(Leffingwell, 2004)	<1	<1	<1
3-hydroxy-2-butanone	800	(Leffingwell, 2004)	<1	<1	<1
octanal	0.7	(Buttery and Ling, 1998)	2.8	1.9	1.0
nonanal	1	(Buttery *et al*., 1988)	17.3	19.0	15.3
2-ethyl-1-hexanol	1,500	(Leffingwell, 2004)	<1	<1	<1
decanal	2	(Buttery *et al*., 1988)	2.7	1.8	7.3
1-octanol	110	(Buttery *et al*., 1988)	<1	<1	<1
delta-octalactone	400	(Rychlik *et al*., 1998)	<1	<1	-

Table 3 Intensities of overall coconut milk aroma in evaporated coconut milk flavoring

raw material	coconut milk aroma intensity[ns]
coconut milk (CM)	3.13 ± 0.31
shredded coconut (SC)	2.93 ± 0.64
coconut cake (CC)	2.37 ± 0.14

[ns] means no significant difference ($p > 0.05$)

สรุป

กลิ่นกะทิกลั่นระเหยสามารถเตรียมได้จากกะทิ มะพร้าวขูด หรือกากมะพร้าว ด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน ซึ่งมีกลิ่นของผลิตภัณฑ์คล้ายกะทิ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เป็นสารปรุงแต่งกลิ่นรสกะทิจากธรรมชาติ โดยชนิดของสารระเหยที่วิเคราะห์ได้จาก EF-CM, EF-SC และ EF-CC รวมถึงคะแนนความเข้มของกลิ่นกะทิโดยรวมจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มมูลค่าของกากมะพร้าวที่เป็นส่วนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกะทิได้อีกทางหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

กานต์ สุขสุแพทย์, จรรยา คงฤทธิ์ และ ณหทัย วิจิตโรทัย. 2555. **การใช้ได้ของกากกะทิเป็นอาหารเสริมในไก่เนื้อ**. แหล่งที่มา: http://161.246.67.22/agri_officer/userfiles/files/55-71W-PA_174_181%205.pdf, 12 ธันวาคม 2558.

ศุภศิริ ศิลาน้อย. 2550. **สารระเหยให้กลิ่นที่สำคัญในข้าวมัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม. 2555. Thailand Food Industry Profiles: **อุตสาหกรรมมะพร้าวและผลิตภัณฑ์เกี่ยวเนื่อง, ประเทศผู้ส่งออกกะทิสำเร็จรูปที่สำคัญ**. แหล่งที่มา: http://fic.nfi.or.th/food/upload/pdf/17_1582.pdf, 13 พฤศจิกายน 2558.

Acree, T. and H. Arn. 2004. **Gas Chromatography-Olfactometry (GCO) of Natural Products.** Available Source: http://www.flavornet.org, October 10, 2015.

Buttery, G.R. and L.C. Ling. 1998. Additional studies on flavor components of corn tortilla chips. **J. Agric. Food Chem.** 46: 2764-2769.

Buttery, G.R., J.G. Turnbaugh and L.C. Ling. 1988. Contribution of volatiles to rice aroma. **J. Agric. Food Chem.** 36: 1006-1009.

Kabir, A. and Y. Lorjaroenphon. 2014. Identification of aroma compounds in coconut sugar, p. 239-246. *In* **Proceedings of the 52nd Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry.** Kasetsart University, Thailand.

Leffingwell, J.C. 2004. **Flavor-Base Database**, Version Date July 01, 2004.

Lin, F.M. and W.F. Wilkens. 1970. Volatile flavor components of coconut meat. **J. Food Sci.** 35(5): 538-539.

Lorjaroenphon, Y. and K.R. Cadwallader. 2015. Identification of character impact odorants in cola-flavored carbonated beverage by quantitative analysis and omission studies of aroma reconstitution models. **J. Agric. Food Chem.** 63: 776-786.

Meilgaard, M.C., G.V. Civille and B.T. Carr. **Sensory Evaluation Techniques**, 4th ed. CRC Press, NW.

Rychlik, M., P. Schieberle and W. Grosch. 1998. **Compilation of Odor Thresholds, Odor Qualities and Retention Indices of Key Food Odorants.** Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie and Institute für Lebensmittelchemie der Technischen Universität München, Garching, Germany.

Seow, C.C. and C.N. Gwee. 1997. Coconut milk: Chemistry and technology. **J. Food Sci. Technol.** 32: 189-201.

Tinchan, P. 2014. **Changes in Odor Characteristics of Canned Coconut Milk during Storage.** Ph.D. Thesis, Kasetsart University.

Tinchan, P., Y. Lorjaroenphon, K.R. Cadwallader and S. Chaiseri. 2015. Changes in the profile of volatiles of canned coconut milk during storage. **J. Food Sci.** 80: C49-C54.

United States Department of Agriculture. n.d. **Basic Report: 12104, Nuts, Coconut Meat, Raw.** Available Source: http://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/3656?fgcd=&manu=&lfacet=&format=&count=&max=35&offset=&sort=&qlookup=12104, December 12, 2015.

Widjaja, R., J.D. Craske and M. Wootton. 1996. Comparative studies on volatile components of non-fragrant and fragrant rices. **J. Sci. Food Agric.** 70: 151-161.

Induction of *Vibrio parahaemolyticus* into viable but nonculturable state under low temperature and nutrient starvation

Natcha Chyerochana[1,2], Damkerng Bundidamorn[1,2] and Sudsai Trevanich[1,2*]

ABSTRACT

Foodborne pathogenic bacteria can enter to the viable but non-culturable (VBNC) state by the unflavored condition normal to growth. The VBNC state of foodborne pathogenic bacteria cannot be cultured under conventional laboratory procedures and then affected accuracy of colony count. This present research aims to study on induction of all three tested strains of *Vibrio parahaemolyticus* into VBNC state by the low temperature and the nutrient starvation. From the results obtained, all three strains of *V. parahaemolyticus* (212/4, 330 and 70/I/2) in late log phase were successfully entered the VBNC state under the starvation medium according to method of Mizunoe *et al*. (2000) at low temperature of 4°C. The number of viable and culturable *V. parahaemolyticus* was counted by standard spread plate technique on tryptic soy agar supplemented with 3% NaCl while viability analysis was determined by the Live/Dead® BacLight™ Bacterial Viability Kits under a confocal laser scanning microscopy. The results showed that *V. parahaemolyticus* 212/4, 330 and 70/I/2 could enter into the VBNC state after 15-30 (average 22.5) days, 14-25 (average 19.5) days and 12-20 (average 16) days culturing under the tested conditions, respectively.

Key Words: Viable but non-culturable (VBNC), *Vibrio parahaemolyticus*, low temperature, nutrient starvation

* Corresponding author; e-mail address: **fagisstn@ku.ac.th**

[1]Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

[2] National Research University, Kasetsart University, Bangkok, 10900

INTRODUCTION

Vibrio parahaemolyticus is a halophilic and gram negative bacterium which inhabits marine and estuarine environments. Most outbreaks of *V. parahaemolyticus* gastroenteritis were reported in USA, Japan, Taiwan and Thailand (Suthienkul, 1998; Yeung and Boor, 2004; McLaughlinet *et al*., 2005). The incidence of outbreak was the cross contamination of food from seafood processing, transportation and sale processes (Kazuhisa *et al*., 2009). Most clinical isolates are hemolytic on Wagatsuma agar (Kanagawa-positive, KP+) and produce a major virulence factor, thermostable direct hemolysin (TDH) (Pan *et al*., 1997; Lozano-Leon *et al*., 2003; Baffone *et al*., 2005). The outbreaks of *V. parahaemolyticus* occurred between the months of April and October (Daniels *et al*., 2000). When the temperature of the seawater is below 13-15ºC, *V. parahaemolyticus* is seldom isolated (Kaneko and Colwell, 1974). A seasonal difference may be due to the finding that *V. parahaemolyticus* enters into a viable but nonculturable (VBNC) state.

Many species of bacteria enter the VBNC state when they are exposed to stressful conditions e.g. starvation with extreme temperature, starvation with oxygen limitation, aerosolization, starvation with salinity and food preservative (Li *et al*., 2014). The VBNC state in some bacteria (*Campylobacter lari, Edwardsiella tarda*, *Enterobacter cloacae* etc.) can be attained by typical low temperature and nutrient downshift conditions (Jiang and Chai, 1996; Bates and Oliver, 2004; Wong and Wang, 2004; Coutard *et al*., 2007; Li *et al*., 2014). As the bacterial cells enter this state, plate counts decline until this bacterium can no longer be cultured by standard microbiological methods. However, a significant population of these non-culturable bacteria can be shown to retain viability as indicated by a variety of direct microscopic assays (Oliver, 2009).

The major characteristics of VBNC are viability and non-culturability. Therefore, the detection of VBNC cell has two main steps. The first step is the estimation of the remaining culturable cells by standard plate count technique. The second step is estimation of viable cell. The most commonly used is commercially Live/Dead® BacLight™ bacterium viability kit. The test kit contains two nucleic acid stains, SYTO 9 and propidium iodide. SYTO 9 labels cells with an intact or damaged membrane and propidium iodide penetrates only cells with damaged membranes. Thus, live cells only stain with SYTO 9 (green). In dead cells, propidium iodide (red) competes with SYTO 9 for nucleic acid binding sites and the cells stain fluorescent red. The other method for estimation of viable cell is detection of gene expression by reverse transcription polymerase chain reaction (RT-PCR) (Li *et al*., 2014).

Based on our knowledge, there are few reports about the study on VBNC state of foodborne pathogenic bacteria in Thailand. This study paid a great attention to VBNC state of *Vibrio parahaemolyticus*. The main objective of this work was to investigate the induction of

V. parahaemolyticus isolated from seafood and food poisoning patient into VBNC state under the low temperature and the nutrient starvation.

MATERIALS AND METHODS

1. Bacteria strains

Three strains of *V. parahaemolyticus* (330, 212/4 and 70/I/2) were used throughout the experiment. The clinical strain of *V. parahaemolyticus* 330 was isolated from food poisoning patient (Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok). The other two culture strains of *V. parahaemolyticus* 212/4 and 70/I/2 isolated from oyster and fresh blue crab meat, respectively were kindly provided by Prof .Dr. Orasa Suthienkul, Mahidol University, Bangkok.

2. Growth studies

Stock strains of *V. parahaemolyticus* were maintained on tryptic soy agar (TSA) supplemented with 3% NaCl slants at ambient temperature. Prior to use, each strain was transferred two-consecutive times in Tryptic soy broth (TSB) supplemented with 3% NaCl and grown to the stationary phase by incubating at 37ºC for 18 h. After incubation, the cultures were transferred to freshly prepared TSB+3% NaCl at a ratio of 0.1:100 and incubated at 37ºC for 24 h. The bacterial cultures were taken in every 1 h-interval. Ten-fold serial dilutions of such bacterial cultures were done. The appropriate dilutions were spread plated onto TSA+3% NaCl and incubated at 37ºC for 24 h. The bacterial counts were reported as colony forming unit (CFU)/ml. This experiment was done triplicately.

3. Induction of VBNC state under low temperature and nutrient starvation

Three strains of *V. parahaemolyticus* (330, 212/4 and 70/I/2) were individually grown to stationary phase in TSB+3% NaCl at 37ºC for 18 h., Each obtaining culture was transferred to fresh TSB+3% NaCl at ratio of 0.1:100 and grown to late log phase at 37ºC for 7 h. The cells were centrifuged at 5,000 *g* for 5 min at 4ºC and washed twice with the starvation medium (Mizunoe *et al*., 2000) to prevent the carry-over of nutrients. The starvation medium was composed of 0.4 g NaCl, 0.1 g KCl, 1.45 g Na_2HPO_4 and 0.1 g KH_2PO_4 per liter of deionized water. The concentration of obtained cells was about 10^7cells/ml. Each strain of *V. parahaemolyticus* (330, 212/4 and 70/I/2) was incubated at 4ºC at different period times until the VBNC state was observed. Each culture was taken and the culturability of the bacterial cells was determined using spread plate technique on TSA+3% NaCl. The plates were incubated at 37ºC for 16 h and numbers of colonies were counted. Bacterial viability was measured using a Live/Dead® BacLight™ bacterium viability kit and viable cell counts were determined by confocal laser microscopy (LSM 5 Pascal, Zeiss, Germany). The experiment was performed in triplicate.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Growth studies

Three strains of *V. parahaemolyticus* (330, 212/4 and 70/I/2) were grown in TSB+3% NaCl at 37ºC for 24 h. The initial growth rates of three strains were found to be reduced as their adaptation to new environment. The growth rates of all *V. parahaemolyticus* strains used were similar. They were grown into log phase within 2 h and entered rapidly to early stationary phase in 8 hours (Fig.1). However, the bacterial culture at late log phase (7 h) was used for further experiment.

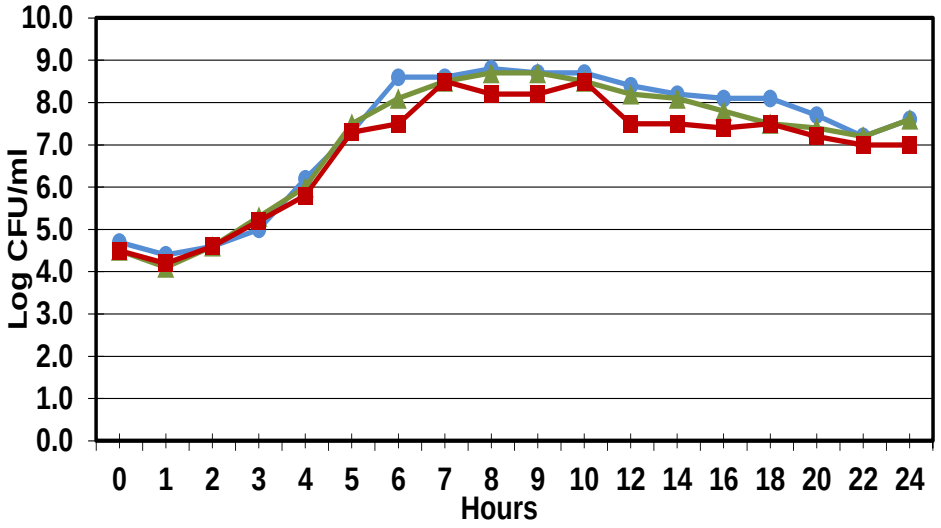


Figure 1 Growth profile of the *Vibrio parahaemolyticus* strain 212/4 (●), strain 330 (▲) and strain 70/I/2 (■) in TSB+3% NaCl at 37ºC for 24 h.

2. Induction of the VBNC state under low temperature and nutrient starvation

Each strain of *V. parahaemolyticus* 212/4, 330 and 70/I/2 was entered into VBNC state after culturing in starvation media at low temperature (4ºC) for 15-30 (average 22.5) days, 14-25 (average 19.5) days and 12-20 (average 16) days, respectively (Table 1). *V. parahaemolyticus* 70/I/2 enters into VBNC state faster than other two strains. Numerous studies also reported that the bacteria with different strains exhibit variation in the time that induces the cells into VBNC state. Such variation seems to be specific of individual strain (Oliver, 2000a; 2000b). Rao *et al*. (2014) reported that the various time in VBNC induction may be attributed to different factors such as, microbial strain, initial cell number, growth phase, cell washing, medium of VBNC induction, and conditions of incubation. Thus, a comparative study using many number of bacteria strains may be helpful in understanding the strain to strain variation in induction time.

Table 1 Average time (days) of an individual *Vibrio parahaemolyticus* strain entering the VBNC state cultured on starvation media at 4ºC

Strain tested	Range (days)	Average (days)
212/4	15-30	22.5
330	14-25	19.5
70/I/2	12-20	16

The results obtained from this study were related with the results of Wong and Wang (2004), who reported that the *V. parahaemolyticus* cells in late log phase could enter into the VBNC state (within 28-35 days) faster than those of stationary phase (42 days). Oliver (2009) also explained that when the bacteria entering into stationary phase cells can induce more stress proteins (e.g. sigma factors; RPOs) compared to the late log phase to protect the cells, thus less induction on the stationary phase bacteria into VBNC cell was observed.

The viable cells of all *V. parahaemolyticus* strains used were determined by Live/Dead® BacLight™. The results indicated that all tested *V. parahaemolyticus* strains entered into VBNC state. The VBNC state of *V. parahaemolyticus* was stained with green-fluorescent SYTO 9 (Fig. 2). SYTO 9 could stain both live and dead bacterial cells, whereas red-fluorescent propidium iodide stain penetrates only bacteria having damaged membranes. When applied both dyes, propidium iodide reduces SYTO 9 fluorescence in dead bacteria with damaged membranes resulting in red fluorescent cells, whereas the live bacteria will present green-fluorescent (Hurst, 1977). In addition, the VBNC state of bacterial cells usually accompanied a change of cell shape and size. As shown in Fig. 2, the morphological change of *V. parahaemolyticus* 70/I/2 occurred after the bacterial cells entered into VBNC state. Rod shaped cells appeared as irregular shapes and finally became coccoid or spheroid forms. Small round cells (< 1 μm) in Fig. 2 were basically considered as VBNC cells of *V. parahaemolyticus* 70/I/2. In addition, morphology of *V. parahaemolyticus* 212/4 and 330 were similar to *V. parahaemolyticus* 70/I/2 (data not shown). This morphological change is commonly found in VBNC cells. However, a change in morphology alone cannot be indicated as the sole parameter to judge whether the cells enter into VBNC state or not, because similar changes in cell morphology are also found in non VBNC cells under stressful conditions (Pinto *et al.*, 2013). Therefore, detection of VBNC cells should be based on cell viability and non-culturability.

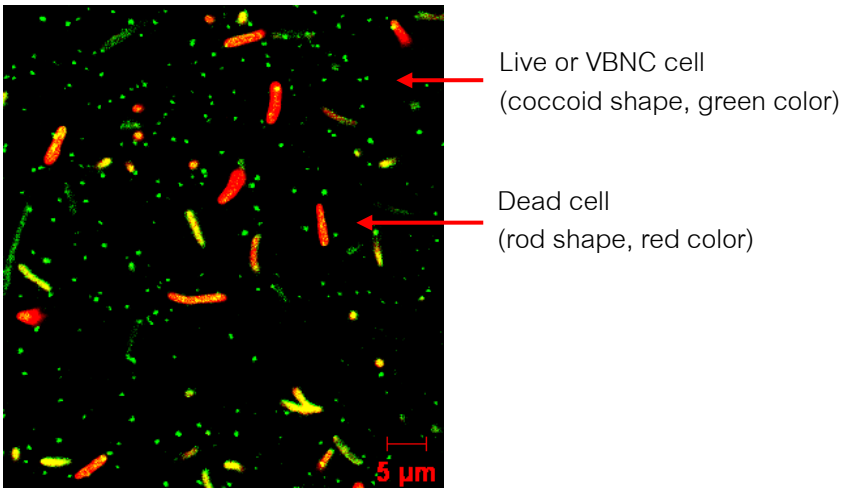


Figure 2 Viability of *V. parahaemolyticus* 70/I/2 in VBNC state determined by the Live/Dead® BacLight™ Bacterial Viability Kits under a confocal laser scanning microscopy.

CONCLUSION

The obtaining results indicated that all tested *V. parahaemolyticus* strains could enter the VBNC state with different induction times under conditions of nutrient starvation and low temperature (4°C). Further molecular and combinatorial experiment is needed to elucidate mechanisms leading to the VBNC state and detection method should be developed to confirm their existence.

ACKKNOWLEDGEMENTS

Financial support for this research was kindly granted from National Research University and Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University.

REFERENCES

Baffone, W., A. Casaroli, R. Campana, B. Citterio, E. Vittoria, L. Pierfelici and G. Donelli. 2005. 'In vivo' studies on the pathophysiological mechanism of *Vibrio parahaemolyticus* TDH^{+}-induced secretion. **Microbial Pathogenesis**. 38: 133–137.

Bates, T. C. and J. D. Oliver. 2004. The Viable but nonculturable state of kanagawa positive and negative strains of *Vibrio parahaemolyticus*. **J. Microbiol.** 42: 74-79.

Coutard, F., S. Lozach, M. Pommepuy and D. Hervio-Heath. 2007. Real-Time Reverse Transcription PCR for transcriptional expression analysis of virulence and housekeeping genes in viable but nonculturable *Vibrio parahaemolyticus* after recovery of culturability. **Appl. Environ. Microbiol.** 73: 5183-5189.

Daniels, N. A., B. Ray, A. Easton, N. Marano, E. Kahn, A. L. McShan, L. Del Rosario, T. Baldwin, M. A. Kingsley, N. D. Puhr, J. G. Wells, and F. J. Angulo. 2000. Emergence of a new *Vibrioparahaemolyticus* serotype in raw oysters. **JAMA.** 284: 1541-1545.

Hurst, A. 1977. Bacterial injury: A review. **Can. J. Microbiol.** 23, 935–944.

Jiang, X. and T. Chai. 1996. Survival of *Vibrio parahaemolyticus* at low temperatures under starvation conditions and subsequent resuscitation of viable, nonculturable cells. **Appl. Environ. Microbiol.** 62: 1300-1305.

Kaneko, T. and R. R. Colwell. 1974. Distribution of *Vibrio parahaemolyticus* and related organisms in the Atlantic Ocean off South Carolina and Georgia. **Applied Microbiology.** 28: 1009–1017.

Kazuhisa, O., I. Masahiko, I. Kento, C. Hideyuki, N. Takashi and S. Tadahiko. 2009. Clinical study of upper gastrointestinal bleeding associated with low-dose aspirin in Japanese patients. **Hepato-gastroenterology** 56 (96): 1665-9.

Li, L., N. Mendis, H. Trigui, J. D. Oliver, S. P. Faucher. 2014. The importance of the viable but non-culturable state in human bacterial pathogens. **Front Microbiol.** 5: 1-20.

Lozano-Leon, A., J. Torres, C.R. Osorio, J. Martinez-Urtaza. 2003. Identification of tdh-positive *Vibrio parahaemolyticus* from an outbreak associated with raw oyster consumption in Spain. **FEMS Microbiology Letters.** 226: 281–284.

McLaughlin, J. B., A. DePaola, C. A. Bopp, K. A. Martinek, N. P. Martinek, C. G. Allison, S. L. Murray, E. C. Thompson, M. M. Bird and J. P. Middaugh. 2005. Outbreak of *Vibrio parahaemolyticus* gastroenteritis associated with Alaskan oysters. **New England Journal of Medicine**. 353(14): 1463-1470.

Mizunoe, Y., S. N. Wai, T. Ishikawa, A. Takade, and S. Yoshida. 2000. Resuscitation of viable but nonculturable cells of *Vibrio parahaemolyticus* induced at low temperature under starvation. **FEMS Microbiol. Lett.** 186: 115-120.

Oliver, J. D. 2000a. Public health significance of viable but nonculturable bacteria, pp. 273-300. *In* R.R. Colwell, and D. J. Grimes, ed. **Non-Culturable Microorganisms in The Environment.** ASM Press, Washington, D.C.

Oliver, J. D. 2000b. Problems in detecting dormant (VBNC) cells, and the role of DNA elements in this response, pp. 1-15. *In* J. K. Jansson, J. D. van Elsas and M. Bailey, ed. **Tracking Genetically Engineered Microorganisms.** Landis Bioscience, Texas.

Oliver, J. D. 2009. Recent findings on the viable but nonculturable state in pathogenic bacteria. **FEMS Microbiol. REV.** 34: 415-425.

Pan, T. M., T. K. Wang, C. L. Lee, S. W. Chien and C. B. Horng. 1997. Food-borne disease outbreaks due to bacteria in Taiwan, 1986 to 1995. **J. Clin. Microbiol.** 35: 1260–1262.

Pinto, D., Santos M. A., Chambel L. 2013. Thirty years of viable but nonculturable state research: Unsolved molecular mechanisms. **Crit. Rev. Microbiol.** 41(1): 61-76.

Rao, N. V., R. Shashidhar and J. R. Bandekar. 2014. Induction, resuscitation and quantitative real-time polymerase chain reaction analyses of viable but nonculturable *Vibrio vulnificus* in artificial sea water. **World J. Microb Biot.** 10: 1-8.

Suthienkul, O. 1998. **Infectious Diseases.** Holistic publishing, Bangkok.

Wong, H. C. and P. Wang. 2004. Induction of viable but non culturable state in *V. parahaemolyticus* and its susceptibity to environmental stresses. **J. Appl. Microbiol.** 96: 359-366.

Yeung, P. S. and K. J. Boor. 2004. Epidemiology, pathogenesis, and prevention of foodborne *Vibrio parahaemolyticus* infections. **Foodborne Pathogens and Disease.** 1(2): 74–88.

ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารยึดเกาะต่อคุณลักษณะของสับปะรดแผ่นใยอาหารสูง

Effects of Type and Concentration of Binders on Properties of High Fiber Pineapple Sheet

สุริยาพร นิพรรัมย์[1*] วิลาสินี ปีระจิตร[2] ศุภฤกษ์ ฤกษ์ฤทัยรัตน์[1] และ อรุณี บุญเขื่อง[1]

Suriyaporn Nipornram[1*], Wilasinee Peerajit[2], Supalerk Lerkruetirat[1] and Arunee Bunkeang[1]

บทคัดย่อ

กากสับปะรดที่เหลือทิ้งจากการผลิตน้ำผลไม้มีปริมาณใยอาหารอยู่สูง จึงนำมาผลิตเป็นสับปะรดแผ่นที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารยึดเกาะช่วยเชื่อมเส้นใยสับปะรดให้ติดกัน โดยศึกษาสารยึดเกาะ 3 ชนิด ได้แก่ อะการ์ (Agar) คาราจีแนน (Carrageenan) และคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose; CMC) ไฮโดรคอลลอยด์แต่ละชนิดใช้ปริมาณ 0.2, 0.5 และ 0.7 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอะการ์ที่ความเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นสารยึดเกาะที่เหมาะสมเพราะสับปะรดแผ่นที่ได้มีแรงต้านแรงดึงและระยะทางที่ถูกดึงต่ำที่สุด คือ 14.59 นิวตัน และ 44.22 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อนำไปเคลือบด้วยซูโครสไซรัปที่มีกรดซิตริกเข้มข้น 0.6, 1.8 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ และนำไปอบแห้ง พบว่าสับปะรดแผ่นที่ใช้กรดซิตริก 1.8 เปอร์เซ็นต์ เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสม ได้รับคะแนนการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสด้านความกรอบ (7.3) และความชอบรวมสูง (7.5) อีกทั้งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลน้อย และปริมาณใยอาหารของสับปะรดแผ่นมีสูงถึง 34.10 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

By product from a pineapple juice industry contained a lot of fiber. Therefore, it was used to produce high fiber pineapple sheet. Hydrocolloids were used as a binder for bonding between pineapple fibers. The effects of binder types (agar, carrageenan and carboxymethyl cellulose) and binder concentrations (0.2, 0.5 and 0.7 %) were investigated. Pineapple sheet containing 0.2 % of agar has the lowest tensile strength and extensibility for 14.59 N and 44.22 mm, respectively. The pineapple sheets were coated with sucrose syrup which contained different concentrations of citric acid (0.6, 1.8 and 3.0 %) and dried. The pineapple sheet contained 1.8 % of citric acid in syrup obtained high score of sensory evaluation including crispiness (7.33) and overall likeness (7.50). In addition, the sheet has less browning reaction and containing high fiber was 34.10%.

Key Words: Hydrocolloid binder, Pineapple sheet, Fiber

* Corresponding author; e-mail address: surinipo@gmail.com

[1]สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก 65000

[1]Department of Agro-industrial, Faculty of Science and Agriculture, Rajamankala Universityof Technology Lanna, Phitsanulok 65000

[2]ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพ 10800

[2]Department of Applied Statistics, Faculty of Applied science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

คำนำ

สับปะรดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย ในปี 2554 ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์สับปะรดปริมาณ 819,373 ตัน คิดเป็นมูลค่าสูงถึง 28,955 ล้านบาท ในจำนวนนี้มีการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำสับปะรดมีการผลิตปริมาณมากถึง 146,771 ตัน (สำนักบริหารการค้าสินค้าทั่วไป, 2554) จากกระบวนการผลิตน้ำสับปะรด พบว่ามีกากสับปะรดเป็นวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก ซึ่งกากสับปะรดเหล่านี้มีใยอาหาร (Dietary fiber) อยู่จำนวนมาก (Upadhyay *et al*., 2013) โดยมีใยอาหารทั้งหมด, ใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ และใยอาหารที่ละลายน้ำ ปริมาณ 75.8, 75.2 และ 0.6 กรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักแห้งตามลำดับ นอกจากนี้กากสับปะรดยังมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Martínez *et al*., 2012)

ใยอาหารเป็นส่วนของพืชที่เอนไซม์ในร่างกายมนุษย์ไม่สามารถย่อยได้จึงไม่ให้พลังงาน แต่มีบทบาทสำคัญต่อโภชนาการ และสุขภาพ (Raninen *et al*., 2011) ใยอาหารจะช่วยเพิ่มปริมาณอุจจาระและกระตุ้นให้เกิดการขับถ่าย ช่วยทำให้การดูดซึมอาหารช้าลง ควบคุมน้ำตาลในเลือดให้ดีขึ้น และช่วยลดระดับคอเลสเตอรอล (Silveira Rodríguez *et al*., 2003) ใยอาหารในท้องตลาดมีจำหน่ายเป็นจำนวนมาก เช่น ผงละลายน้ำรับประทาน เครื่องดื่ม หรือเป็นเม็ดยา ซึ่งมีจำนวนน้อยมากที่ผลิตมาในรูปแบบขนมขบเคี้ยว โดยเฉพาะในรูปแบบแผ่นกรอบคล้ายสาหร่ายยังไม่มีในท้องตลาด ซึ่งสาหร่ายแผ่นกรอบในท้องตลาดเป็นที่นิยมมาก นอกจากนี้ตลาดขนมขบเคี้ยวมีมูลค่ากว่า 30,000 ล้านบาท ซึ่งส่วนแบ่งตลาดของสาหร่ายอบกรอบมากถึง 8 เปอร์เซ็นต์ (วรันศ์ บัฟเฟต, 2556) ก่อนหน้านี้ได้มีงานวิจัยที่นำผักชนิดต่าง ๆ เช่น คะน้า ตำลึง กระเพรา พริก มาทำเป็นแผ่นเพื่อผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวที่มีปริมาณใยอาหารสูงอีกด้วย (สฤษดิ์ฤกษ์ และคณะ, 2551; อนุวัตร และคณะ, 2550 และวัฒนา, 2548) แต่ยังไม่มีข้อมูลว่ามีการนำกากผลไม้เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม โดยเฉพาะกากสับปะรดมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวชนิดแผ่นอบกรอบปรุงรส โดยใช้ไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารยึดเกาะเพื่อช่วยเชื่อมติดกากสับปะรดให้เป็นแผ่น

ไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีหลายประเภท เช่น อะการ์ คาราจีแนน อนุพันธ์เซลลูโลส ได้แก่ เมทิลเซลลูโลส (methyl cellulose, MC), ไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส (hydroxyethyl cellulose, HEC), คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose, CMC) สามารถใช้เป็นสารยึดเกาะระหว่างอนุภาคได้ และเกิดเป็นชั้นฟิล์มบาง (Saha and Bhattacharya, 2010; Dhanapal *et al*., 2012)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำกากสับปะรดมาผลิตเป็นอาหารว่างลักษณะเป็นแผ่นอบกรอบปรุงรสคล้ายสาหร่าย และมีใยอาหารสูง สามารถรับประทานเป็นอาหารว่างได้ และเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการด้านใยอาหาร โดยศึกษาชนิด และปริมาณของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นสารยึดเกาะเชื่อมติดกากสับปะรดให้เป็นแผ่น โดยแผ่นสับปะรดมีความเหนียวน้อยที่สุด และหาความเข้มที่เหมาะสมของกรดซิตริกที่ใช้ร่วมกับซูโครสไซรัป เพื่อใช้ปรุงรสและปรับปรุงเนื้อสัมผัสของสับปะรดแผ่น

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสารยึดเกาะสำหรับผลิตสับปะรดแผ่น

ศึกษาชนิด และความเข้มข้นของสารยึดเกาะกากสับปะรดเพื่อให้ได้สับปะรดแผ่นที่มีลักษณะเป็นแผ่นสมบูรณ์ ไม่แตกหรือมีช่องว่าง และมีความเหนียวน้อยที่สุด เพราะว่าเมื่อนำไปเคลือบไซรัปในขั้นตอนถัดไปสับปะรดแผ่นที่ได้จะมีความกรอบคล้ายสาหร่ายแผ่นกรอบ โดยศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารยึดเกาะที่

เหมาะสม ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำการทดลอง ทำการวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design และจัดการแผนการทดลองโดยใช้ Factorial เพื่อศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัย คือ ชนิดของสารยึดเกาะ และความเข้มข้นของสารยึดเกาะ โดยเปรียบเทียบสารยึดเกาะ 3 ชนิด ได้แก่ อะการ์ (Agar) คาราจีแนน (Carrageenan) และคาร์บอกซีเมททิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose: CMC) ความเข้มข้นของสารยึดเกาะแต่ละชนิดที่ใช้ได้แก่ 0.2, 0.5 และ 0.7 เปอร์เซ็นต์ของสารละลาย โดยละลายสารยึดเกาะด้วยน้ำร้อน และปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร

การผลิตสับปะรดแผ่นอบแห้ง

นำกากสับปะรดที่ผ่านการคั้นเอาน้ำออกแล้วปริมาณ 85 กรัม ผสมกับสารละลายที่ใช้ยึดเกาะแต่ละชนิดปริมาณ 15 กรัม ผสมจนเข้ากันและเทลงบนแผ่นเทปลอนขนาด 30×44.5 เซนติเมตร และปิดทับด้านบนด้วยแผ่นพลาสติกใส จากนั้นจึงรีดตัวอย่างกากสับปะรดผสมสารยึดเกาะให้เต็มแผ่น ลอกแผ่นพลาสติกด้านบนออก นำไปอบที่ตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (วัฒนา, 2548) ลอกสับปะรดแผ่นออกจากพลาสติกที่เคลือบเทปลอนเพื่อกลับด้านอบต่ออีก 1 ชั่วโมง แล้วนำมาตัดเป็นแผ่นขนาด 3×9 เซนติเมตร แล้วบรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท

การวิเคราะห์หาคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของสับปะรดแผ่นอบแห้ง

ตัวอย่างสับปะรดแผ่นนำไปวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT. plus โดยใช้หัวแบบ A/TG โดยตั้งค่า pre-test speed 0.2 mm/s, test speed 0.5 mm/s, post-test speed 10.0 mm/s และ target mode เป็น distance ดัดแปลงมาจาก (Voon *et al*., 2012) ประมวลผลด้วยโปรแกรม texture exponent 32 เพื่อให้ได้ค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และ ระยะทางที่ดึงได้สูงสุด (Extensibility) โดยวัดแต่ละตัวอย่างจำนวน 10 ซ้ำ และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ ($p<0.05$)

การเคลือบไซรัปที่มีส่วนผสมของกรดบนสับปะรดแผ่น

นำสับปะรดแผ่นที่มีความเหนียวน้อยที่สุด มาเคลือบไซรัปที่มีความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.6, 1.8 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ โดยเตรียมไซรัปจากการละลายน้ำตาลซูโครสด้วยน้ำร้อนจนมีความเข้มข้นที่ 60 องศาบริกซ์ จากนั้นปรับกรดซิตริกให้มีความเข้มข้น 0.6, 1.8 และ 3.0 เปอร์เซ็นต์ นำสารละลายไซรัปที่เตรียมได้ปริมาณ 6 มิลลิลิตร มาเทลงบนแผ่นสับปะรดด้านละ 3 มิลลิลิตร และใช้แปรงยางปลายตัดตรงทาให้ทั่วแผ่นในแต่ละด้านของแผ่นสับปะรดจนทั่ว นำเข้าตู้อบลมร้อนอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำสับปะรดแผ่นที่ได้มาทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองแบบ Randomized Completely Block Design (RCBD) โดยทำการทดสอบด้านสี กลิ่น ความหวาน ความเปรี้ยว เนื้อสัมผัส และความชอบรวมของผู้ทดสอบ ด้วยวิธี 9-point hedonic rating scale จากผู้ทดสอบจำนวน 30 คน เมื่อระดับคะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ ระดับคะแนน 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด (Lawless and Heymann, 2010) และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ ($p<0.05$)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรดแผ่นใยอาหารสูง

เลือกตัวอย่างสับปะรดแผ่นที่ได้คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสดีที่สุดมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณโปรตีน, ไขมันทั้งหมด, เถ้า, เยื่อใยอาหาร (dietary fiber) และคำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2000)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของชนิดและสารยึดเกาะต่อเนื้อสัมผัสของสับปะรดแผ่น

ปัจจัยเดี่ยว (Individual effects) ทั้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของสารยึดเกาะและความเข้มข้นของสารยึดเกาะ มีผลต่อเนื้อสัมผัสทั้งแรงต้านแรงดึงและระยะทางดึงสูงสุดของสับปะรดแผ่น อีกทั้งปัจจัยร่วม (Interaction effect) ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของสารยึดเกาะมีผลต่อเนื้อสัมผัสของสับปะรดแผ่นเช่นกัน หมายถึง สับปะรดแผ่นที่ใช้สารยึดเกาะร่วมกับความเข้มข้นของสารยึดเกาะที่แตกต่างกัน ให้ค่าแรงต้านแรงดึงสูงสุดและระยะทางดึงสูงสุดของตัวอย่างที่แตกต่างกัน ($p<0.01$) ค่าแรงต้านแรงดึงและระยะทางดึงสามารถบ่งชี้ถึงระดับของความเหนียวได้ หมายถึง ถ้าตัวอย่างมีแรงต้านแรงดึงและระยะทางดึงสูงสุดมากแสดงว่าตัวอย่างมีความเหนียวมาก แต่ถ้าตัวอย่างมีแรงต้านแรงดึงหรือระยะทางดึงสูงสุดน้อยแสดงถึงตัวอย่างมีความเหนียวน้อย สับปะรดแผ่นที่ผลิตจากการใช้ปัจจัยร่วมระหว่างชนิดและความเข้มข้นของสารยึดเกาะที่แตกต่างกันทั้งหมดมี 9 สิ่งทดลอง พบว่าสับปะรดแผ่นที่ใช้สารยึดเกาะชนิดอะการ์ที่ความเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์ ยึดเกาะการสับปะรดให้ขึ้นรูปเป็นแผ่นดีที่สุด เนื่องจากมีค่าระยะทางที่ตัวอย่างถูกดึง 44.22 มิลลิเมตรน้อยกว่าตัวอย่างอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1 แสดงว่าตัวอย่างดังกล่าวมีความเหนียวน้อยที่สุดเป็นสิ่งทดลองที่ดีที่สุด เพราะเมื่อนำสับปะรดแผ่นที่มีความเหนียวน้อยไปเคลือบไซรัปในขั้นตอนถัดไปจะส่งผลให้ได้แผ่นสับปะรดที่กรอบไม่เหนียวติดฟัน

อะการ์เป็นไฮโดรคลอลอยด์ชนิดไฮโดรฟิลิค เป็นเจลที่แข็งแรงถึงแม้จะใช้สารปริมาณความเข้มข้นต่ำ ๆ เจลที่ได้เมื่ออบแห้งจะได้ฟิล์มที่แข็งแรง (Dhanapal *et al*., 2012) จึงนิยมนำมาทำฟิล์มที่รับประทานได้ (Edible films) ในอาหาร (Baldwin *et al*., 2011;Tian *et al*., 2011) และบรรจุภัณฑ์อาหาร (Rhim, 2011)

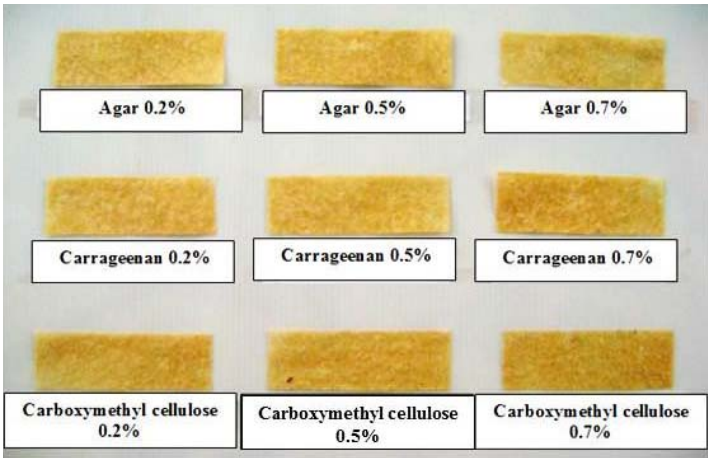


Figure 1 Pineapple sheets using different type and concentration of the binders

Table 1 Texture properties of high fiber pineapple sheets produced from different types and concentrations of binders

Binders		Textural properties	
Type	Concentration (%)	Tensile strength (N)	Extensibility (mm)
Agar	0.2	14.59±5.33a	44.22±2.90a
	0.5	15.49±3.27ab	46.24±1.17bc
	0.7	24.27±3.49dc	48.66±0.84c
Carrageenan	0.2	20.38±5.37c	46.90±0.75cd
	0.5	16.73±4.31ab	46.13±1.45b
	0.7	26.26±6.55c	46.92±0.07cd
Carboxylmethyl	0.2	17.76±4.20bc	47.06±0.63d
cellulose	0.5	17.16±5.36ab	47.11±0.65d
	0.7	23.38±7.38d	47.01±0.58d

a, b, c and d: Mean values with different letters in columns are significantly different; $p < 0.05$

ผลการศึกษาความเข้มข้นของกรดซิตริกในไซรัปเคลือบสับปะรดแผ่น

สับปะรดแผ่นที่ใช้อะการ์ความเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์เป็นสารยึดเกาะจากการทดลองที่ผ่านมาถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้ โดยนำมาสับปะรดแผ่นที่ได้มาเคลือบไซรัปจากน้ำตาลซูโครสที่มีกรดซิตริกที่ความเข้มข้นที่ระดับต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงรสชาติและเนื้อสัมผัส จากนั้นนำไปอบแห้งได้สับปะรดแผ่นที่กรอบและมีสีเหลือง เมื่อเปรียบเทียบด้านสีของตัวอย่างพบว่า สับปะรดแผ่นที่ใช้กรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.6 และ 1.8 เปอร์เซ็นต์ เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลน้อย พิจารณาจากค่าสี L* แสดงถึงความสว่าง มีค่ามากกว่าความเข้มข้นที่ 3.0 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาค่าสี a* ร่วมด้วย พบว่าที่ความเข้มข้น 1.8 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสี a* น้อยกว่าตัวอย่างที่ใช้กรดซิตริก 0.6 เปอร์เซ็นต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังตารางที่ 2 ซึ่งค่าการเกิดสีน้ำตาลเกิดจากสีแดงและสีดำเพิ่มขึ้นในตัวอย่าง การทดลองนี้จึงพิจารณาค่าสี a* ร่วมด้วย Ramallo and Mascheroni (2012) เนื่องจากกรดซิตริกมีความสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในอาหารได้ (Xing *et al*., 2010; Suttirak and Manurakchinakorn, 2010)

Table 2 The color values of pineapple sheets coated with syrup having citric different concentrations

Citric concentration	Color value		
(%)	L*	a*	b*
0.6	63.26±0.12b	2.38±0.32b	37.91±0.87c
1.8	63.55±0.08c	1.82±0.46a	34.21±1.29a
3.0	62.71±0.29a	1.96±0.18a	35.50±0.81b

a, b and c: Mean values with different letters in columns are significantly different; $p < 0.05$

การทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น ความหวาน ความเปรี้ยว ความกรอบ และความชอบรวมของสับปะรดแผ่นเคลือบไซรัปที่ใช้กรดซิตริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน พบว่าความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ 0.6 และ 1.8 มีคะแนนความชอบรวมมากกว่าความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ 3.0 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังตารางที่ 3 แต่สับปะรดแผ่นเคลือบไซรัปที่ใช้กรดซิตริกที่ 1.8 เปอร์เซ็นต์ เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเลือกไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

Table 3 Sensory parameters of pineapple sheets coated with syrup having citric different concentrations

Citric concentration (%)	Sensory parameter					
	Color ^{ns}	Odor ^{ns}	Sweet taste	Acid taste^{ns}	Crispiness	Overall liking
0.6	7.3±0.4	7.2±0.3	7.1±0.2b	6.7±0.7	7.0±0.6ab	7.2±0.5b
1.8	7.1±0.2	7.0±0.2	6.9±0.3b	6.9±0.8	7.3±0.1b	7.5±0.2b
3.0	6.9±0.4	6.7±0.4	5.4±0.2a	6.3±0.6	6.5±0.3a	6.3±0.3a

a and b: Mean values with different letters in columns are significantly different; $p < 0.05$

ns: Mean values in column is not significantly different; $p \geq 0.05$

สับปะรดแผ่นที่ใช้อะการ์ความเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นสารยึดเกาะและเคลือบด้วยไซรัปที่มีกรดอะซิตริกเข้มข้น 1.8 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 2 ถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 4 มีใยอาหาร (dietary fiber) ในสับปะรดแผ่น 34.10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปริมาณสูงกว่า 6 กรัมต่ออาหาร 100 กรัม (เป็นปริมาณที่กำหนดตามเงื่อนไขการกล่าวอ้างว่ามีใยอาหารสูง) จึงสามารถระบุหรืออ้างว่าสับปะรดแผ่นมีใยอาหารสูงได้ ตามเงื่อนไขการกล่าวอ้างโภชนาการบัญชีหมายเลข 4 แนบท้ายประกาศ กระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ. 2541 (ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, 2541) ซึ่งสับปะรดอบแผ่นที่ผลิตได้จึงจัดได้ว่าเป็นอาหารที่มีใยอาหารสูง

Table 4 Proximate composition of high fiber pineapple sheet (Dry basis)

Compositions	Percentage (%)
Dietary fiber	34.10±0.4
Crude fat	2.93±0.17
Crude protein	3.11±0.07
Ash	1.22±0.17
Moisture content	3.44±0.17
Carbohydrate	55.20



Figure 2 High fiber pineapple sheet

สรุป

การผลิตสับปะรดแผ่นที่มีใยอาหารสูงจำเป็นต้องใช้ไฮโดรคอลลอยด์เพื่อใช้เป็นสารยึดเกาะเส้นใยสับปะรดและสร้างเป็นฟิล์มบาง ซึ่งอะการ์ ความเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นสารยึดเส้นใยเกาะสับปะรดที่ดี ทำให้ได้สับปะรดแผ่นที่ไม่เหนียว เมื่อนำสับปะรดแผ่นไปเคลือบด้วยไซรัปโดยใช้กรดซิตริกที่ 1.8 เปอร์เซ็นต์ เป็นสิ่งทดลองที่ผู้ทดสอบให้คะแนนด้านความกรอบ และความชอบรวมสูง อีกทั้งยังเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลน้อย และปริมาณใยอาหารของสับปะรดแผ่นมีสูงถึง 34.10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารอ้างอิง

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข. 2541. **ฉลากโภชนาการ**. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ. 2541.

วัฒนา ดำรงรัตน์กูล. 2548. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักแผ่น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรันศ์ บัฟเฟต. 2556. ตลาดสแน็กสามหมื่นล้านขายวูบ. **ฐานเศรษฐกิจ** 33 (2,878). แหล่งที่มา: http://www.thanonline.com/index.php?opt ... Itemid=417, วันที่สืบค้น 12 กันยายน พ.ศ. 2557

สำนักบริหารการค้าทั่วไป. 2554. **การส่งออกสับปะรดและพัฒนาผลิตภัณฑ์สับปะรด**. ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศ และการสื่อสาร กระทรวงพานิชย์. แหล่งที่มา: http://www.dft.go.th, วันที่สืบค้น 2 ตุลาคม 2554

อนุวัตร แจ้งชัด, นรลักษณ์ รัตนฐิตินันต์ และ วัณณิตา จิรังรัตน์. 2550. **การพัฒนาพริกหวานแผ่น**. รายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 45. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

AOAC. 2000. Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of Analysis**. 17th ed. International. Gailthersbury, Maryand. 2087-2417. USA.

Baldwin, E. A., Hagenmaier, R. and J. Bai. 2011. **Edible coatings and films to improve food quality**. CRC Press. Boca Raton, USA.

Dhanapal, A., Rajamani, L., and M. S. Banu. 2012. Edible films from Polysaccharides. **Food Science and Quality Management** 3: 9-17.

Lawless, H. T. and H. Heymann. 2010. **Sensory evaluation of food: principles and practices**. Vol. 5999: Springer Science & Business Media.

Martínez, R., Torres, P., Meneses, M. A., Figueroa, J. G., Pérez-Álvarez, J. A. and M. Viuda-Martos. 2012. Chemical, technological and in vitro antioxidant properties of mango, guava, pineapple and passion fruit dietary fibre concentrate. **Food Chemistry** 135(3): 1520-1526.

Ramallo, L. and R. Mascheroni. 2012. Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. **Food and bioproducts processing** 90(2): 275-283.

Raninen, K., Lappi, J., Mykkänen, H. and K.Poutanen. 2011. Dietary fiber type reflects physiological functionality: comparison of grain fiber, inulin, and polydextrose. **Nutrition reviews** 69(1): 9-21.

Rhim, J. W. 2011. Effect of clay contents on mechanical and water vapor barrier properties of agar-based nanocomposite films. **Carbohydrate polymers** 86(2): 691-699.

Saha, D., and S. Bhattacharya. 2010. Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: a critical review. **Journal of food science and technology** 47(6): 587-597.

Silveira Rodríguez, M. B., Monereo Megías, S. and B. Molina Baena. 2003. Functional Foods and Optimum Nutrition: A Way or Away?. **Revista Española de Salud Pública** 77(3): 317-331.

Suttirak, W. and S. Manurakchinakorn. 2010. Potential application of ascorbic acid, citric acid and oxalic acid for browning inhibition in fresh-cut fruits and vegetables. **Walailak Journal of Science and Technology** 7(1): 5-14.

Tian, H., Xu, G., Yang, B. and G. Guo. 2011. Microstructure and mechanical properties of soy protein/agar blend films: Effect of composition and processing methods. **Journal of Food Engineering** 107(1): 21-26.

Upadhyay, A., Lama, J. P. and S. Tawata. 2013. Utilization of pineapple waste: a review. **Journal of Food Science and Technology Nepal**. 6: 10-18.

Voon, H. C., Bhat, R., Easa, A. M., Liong, M. and A. Karim. 2012. Effect of addition of halloysite nanoclay and SiO_2 nanoparticles on barrier and mechanical properties of bovine gelatin films. **Food and Bioprocess Technology** 5(5): 1766-1774.

Xing, Y., Li, X., Xu, Q., Jiang, Y., Yun, J. and W. Li. 2010. Effects of chitosan-based coating and modified atmosphere packaging (MAP) on browning and shelf life of fresh-cut lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaerth). **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 11(4): 684-689.

การแบ่งกลุ่มผู้บริโภคอาหารฮาลาลนำเข้าในเมืองจาการ์ตา ประเทศอินโดนีเซีย

Clustering of Consumers for Imported Halal Foods in Jakarta, Indonesia

ชนาธินาถ ผาสุพรรณ์[1*] และ รวิพิมพ์ ฉวีสุข[1]

Chanathinart Pasuphan[1*] and Ravipim Chaveesuk[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบวิธีการแบ่งกลุ่มผู้บริโภคอาหารฮาลาลนำเข้าในเมืองจาการ์ตา จำนวน 386 คน ระหว่างวิธี K-means clustering และวิธี Two step clustering analysis โดยพิจารณาจาก Root Mean Square Standard Deviation (RMSSTD) และค่า R^2 พบว่า วิธี Two step cluster analysis เป็นวิธีการแบ่งกลุ่มที่ดีกว่า มีค่า RMSSTD ต่ำกว่าและค่า R^2 สูงกว่า ซึ่งสามารถแบ่งผู้บริโภคเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มรักสุขภาพและอนุรักษ์นิยม จำนวน 236 คน เป็นผู้ที่เน้นบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพและได้มาตรฐานฮาลาล มีกำลังในการซื้อสินค้าสูง จัดเป็นกลุ่มเป้าหมายหลัก และกลุ่มเป้าหมายรองคือ กลุ่มวัยรุ่นและเปิดรับสิ่งใหม่ จำนวน 150 คน กลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับกลุ่มเป้าหมายหลักจะเน้นตลาดอาหารฮาลาลพรีเมียม มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ปราศจากสิ่งเจือปน และมีระบบการผลิตและบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสื่อสารคุณลักษณะเหล่านี้ให้กับผู้บริโภคผ่านฉลากและโบรชัวร์ จัดจำหน่ายในซุปเปอร์มาร์เก็ตพรีเมียม มีชื่อเสียงด้านสุขอนามัยและวางขายผลิตภัณฑ์นำเข้า มีที่จอดรถปลอดภัยและเพียงพอ ผู้ประกอบการควรร่วมมือกับผู้นำเข้าในการจัดการสื่อสารทางการตลาด เช่น การจัดสินค้าเป็นเซตในราคาพิเศษ และการให้ของแถมเป็นสินค้าพรีเมียม

ABSTRACT

This research compared two clustering methods to cluster 386 consumers who consumed imported halal foods in Jakarta: K-means clustering and Two step cluster analysis. Evaluation criteria were Root Mean Square Standard Deviation (RMSSTD) and R^2. Two step cluster analysis was observed to be better method with lower RMSSTD and higher R^2. Two consumer clusters based on this method were Health and Conservative consumers consisting of 236 respondents and Young and Open-minded consumers consisting of 150 respondents. The Health and Conservative consumers preferred health foods with halal standard. They had a high purchasing power and were thus a targeted consumer for Thai halal food products. This targeted consumer emphasizes on high nutrition value, health benefits, no food additives and environmentally friendly processing system and packaging. These premium features must be communicated to consumers through labels and brochures. Premium distribution channels such as premium supermarket with good hygiene and good reputation about high quality imported products as well as safe and convenient parking were required. Thai exporter may cooperate with Indonesian importer to promote premium products through special price set and giveaway of premium products.

Key Words : consumers clustering, imported halal foods, k-means clustering, two step cluster analysis, Jakarta

* Corresponding author; e-mail address: **babymine_ne@hotmail.com**

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

อินโดนีเซียมีประชากรมุสลิมประมาณ 300 ล้านคน คิดเป็นร้อยละ 13 ของประชากรมุสลิมทั่วโลก (กระทรวงการต่างประเทศ, 2546) มีมูลค่าตลาดอาหารฮาลาล 78,000 ล้านดอลลาร์ คิดเป็นร้อยละ 16 ของตลาดอาหารฮาลาลทั่วโลก (ศูนย์ข้อมูลธุรกิจไทยในอินโดนีเซีย, 2555) จาการ์ตาเป็นเมืองหลวงของอินโดนีเซีย มีประชากรมากที่สุดในประเทศประมาณ 10 ล้านคน เป็นศูนย์กลางทางเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และเป็นเมืองท่าในการนำเข้าที่สำคัญของเกาะชวาและของประเทศ มีอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจร้อยละ 6.63 ผู้บริโภคในจาการ์ตามีวิถีชีวิตที่เร่งรีบ ต้องการอาหารที่สะดวกและรวดเร็ว และเป็นสังคมที่เปิดรับสิ่งใหม่ (สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม, 2556) ในขณะที่ผู้ประกอบการในประเทศไม่สามารถผลิตอาหารฮาลาลได้เพียงพอต่อความต้องการ (ศูนย์วิทยาศาสตร์ฮาลาลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556) ซึ่งนับว่าเป็นโอกาสของผู้ประกอบการในไทย เนื่องจากผู้บริโภคชาวจาการ์ตาและอินโดนีเซียมีทัศนคติที่ดีต่อสินค้าอาหารไทย ได้รับการยอมรับในด้านรสชาติ คุณภาพ และราคาเมื่อเทียบกับสินค้าอาหารของประเทศคู่แข่ง ได้แก่ จีน และเวียดนาม ซึ่งมีราคาใกล้เคียงกัน ทำให้สินค้าอาหารไทยมักจะวางจำหน่ายในซุปเปอร์มาร์เก็ตชั้นนำ (ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย, 2556; ศูนย์บริการข้อมูลระหว่างประเทศ, 2556; Farabi and Chaveesuk, 2015) จาการ์ตาจึงเป็นตลาดที่สำคัญในการนำเข้าและกระจายสินค้าอาหารฮาลาลจากประเทศไทย

การศึกษาเกี่ยวกับการแบ่งกลุ่มผู้บริโภค จะช่วยให้แบ่งตลาดออกเป็นกลุ่ม (segment) เข้าใจในลักษณะและพฤติกรรมผู้บริโภคเฉพาะกลุ่ม กำหนดตลาดเป้าหมายและวางกลยุทธ์ทางการตลาดให้เหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมายมากขึ้น วิธีการแบ่งกลุ่ม (Clustering analysis) ที่ได้รับความนิยมมี 3 วิธี ได้แก่ K-means clustering เหมาะสมกับข้อมูลจำนวนมาก เช่น 200 ตัวอย่างขึ้นไป Hierarchical clustering เหมาะสำหรับข้อมูลจำนวนไม่เกิน 200 ตัวอย่าง และ Two step cluster analysis ซึ่งสามารถเลือกจำนวนกลุ่มได้อัตโนมัติและมีประสิทธิภาพสำหรับข้อมูลจำนวนมาก การแบ่งกลุ่มผู้บริโภคด้วย Two step cluster analysis จากพฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภคชาวกรีกที่มีต่อผลิตภัณฑ์ประมง ได้แก่ ความถี่ในการบริโภค จุดที่สั่งซื้อ ความชอบของชนิดการแปรรูป ราคา แหล่งของผลิตภัณฑ์ และลักษณะทางประชากรศาสตร์ (Eleni *et al*. 2013) สามารถแบ่งกลุ่มผู้บริโภคเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่มีศักยภาพสูงในการบริโภคมีอายุระหว่าง 26-35 ปี การศึกษาระดับสูง รายได้ระหว่าง 1,001-1,500 ยูโร ทำงานภาครัฐ และมีความถี่ในการบริโภคต่ำ นิยมซื้อผลิตภัณฑ์ประมงแช่แข็งหรือผ่านกระบวนการทำสุกแล้วจากซุปเปอร์มาร์เก็ต และกลุ่มที่มีศักยภาพต่ำในการบริโภคมีอายุมากกว่า 50 ปี การศึกษาระดับปานกลาง รายได้น้อยกว่า 700 ยูโร และทำงานเอกชน นิยมผลิตภัณฑ์ประมงที่จับตามธรรมชาติมีความถี่ในการบริโภคสูงกว่า เลือกซื้อผลิตภัณฑ์ประมงที่สดมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่แช่แข็งและไม่ผ่านกระบวนการทำสุกจากร้านขายปลา ในขณะที่พิมพ์รวี (2554) ศึกษาทัศนคติ พฤติกรรม และปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้ออาหารสุขภาพของผู้บริโภคที่อาศัยในกรุงเทพมหานคร แบ่งกลุ่มผู้บริโภคด้วยวิธี K-means clustering จากกลุ่มปัจจัยมีผลต่อการตัดสินใจซื้อ คือ ลดความเสี่ยงปัญหาสุขภาพ คุณภาพชีวิต ความชอบออร์แกนิก รสชาติ ราคา สิ่งแวดล้อม และการให้ข้อมูลกับผู้บริโภค สามารถแบ่งกลุ่มผู้บริโภคได้ 5 กลุ่ม คือ กลุ่มสนใจสุขภาพแบบอิงกระแสซึ่งไม่ให้ความสำคัญต่อปัจจัยด้านลดความเสี่ยงปัญหาสุขภาพและการให้ข้อมูล กลุ่มใช้ชีวิตตามสบายโดยไม่มีการวางแผนซึ่งไม่ให้ความสำคัญต่อปัจจัยด้านคุณภาพชีวิต ส่วนกลุ่มคำนึงถึงราคาก่อนแม้ใส่ใจสุขภาพ

ให้ความสำคัญกับราคาแต่ไม่ให้ความสำคัญกับความซอบเกษตรอินทรีย์และสิ่งแวดล้อม กลุ่มป้องกันโรคและบริหารเวลาเพื่อสร้างสมดุลชีวิตที่ให้ความสำคัญต่อคุณภาพชีวิต ลดความเสี่ยงปัญหาสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และกลุ่มเคร่งครัดต่อการสร้างสมดุลเพื่อสุขภาพซึ่งให้ความสำคัญต่อคุณภาพชีวิตและซอบเกษตรอินทรีย์สูงมาก รวมถึงให้ความสำคัญต่อปัจจัยด้านการให้ข้อมูล แต่ไม่ให้ความสำคัญต่อปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและลดความเสี่ยงปัญหาสุขภาพ อย่างไรก็ตามงานวิจัยประยุกต์ส่วนมากจะเลือกใช้วิธีการแบ่งกลุ่มวิธีใดวิธีหนึ่งโดยไม่มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกัน

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบการแบ่งกลุ่มผู้บริโภคอาหารฮาลาลนำเข้าในเมืองจาการ์ตาระหว่างวิธี K-means clustering กับ Two step cluster analysis เพื่อวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะ พฤติกรรม และวิถีชีวิตของผู้บริโภคในแต่ละกลุ่มที่มีต่ออาหารฮาลาลนำเข้า รวมถึงปัจจัยทางการตลาดที่มีอิทธิพลต่อผู้บริโภคแต่ละกลุ่ม เพื่อใช้ในการกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคเป้าหมายได้

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เก็บข้อมูลจากการสำรวจผู้บริโภคด้วยแบบสอบถามซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ วิถีการดำเนินชีวิต ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจในการซื้อ และข้อมูลด้านประชากรศาสตร์จากผู้บริโภคในเมืองจาการ์ตา ประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งเคยบริโภคอาหารฮาลาลนำเข้าและจะเลือกซื้อซ้ำอีกจำนวน 386 คน

2. ตรวจสอบตัวแปรด้านวิถีการดำเนินชีวิตว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญด้วยค่าสถิติ Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) หากค่า KMO มากกว่า 0.50 แสดงว่าตัวแปรเหล่านั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ จะต้องนำไปวิเคราะห์กลุ่มปัจจัย เพื่อจัดกลุ่มรวมตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ไว้ในกลุ่มปัจจัยเดียวกันเป็นการลดจำนวนตัวแปรลง ให้เหมาะสมสำหรับการแบ่งกลุ่มผู้บริโภค ซึ่งจำนวนกลุ่มปัจจัยที่เหมาะสมจะพิจารณาค่า Eigenvalue ที่มีค่ามากกว่า 1 (กัลยา, 2548)

3. แบ่งกลุ่มผู้บริโภคโดยเปรียบเทียบระหว่างวิธี K-means clustering และวิธี Two step cluster analysis จากกลุ่มปัจจัยวิถีการดำเนินชีวิตที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบร่วมกับลักษณะทางประชากรศาสตร์ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการซื้อ ได้แก่ เพศ สถานภาพ ศาสนา อายุ อาชีพ การศึกษา รายได้ครอบครัว ที่พักอาศัย การมีเด็กและผู้สูงอายุในครอบครัว โดยกำหนดจำนวนกลุ่มเป็น 2 กลุ่ม เพื่อให้มีลักษณะเด่น มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน และมีจำนวนสมาชิกในกลุ่มเหมาะสม

4. เปรียบเทียบประสิทธิผลในการแบ่งกลุ่มผู้บริโภคระหว่างวิธี K-means clustering และวิธี Two step cluster analysis ดังนี้

4.1 การวัดความแตกต่างของข้อมูลภายในกลุ่มด้วยค่า Root Mean Square Standard Deviation (RMSSTD) ซึ่งถ้า RMSSTD มีค่าน้อย แสดงว่าข้อมูลที่ถูกจัดไว้ภายในกลุ่มเดียวกันมีความใกล้เคียงกันมากหรือมีประสิทธิผลในการแบ่งกลุ่มดี (Halkidi et al., 2002) สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\mathrm{RMSSTD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{p}(x_{ij}-\bar{x}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{p}(n_{ij}-1)}}$$

โดยที่ k หมายถึง จำนวนกลุ่มผู้บริโภคที่แบ่งได้ทั้งหมด; p หมายถึง จำนวนตัวแปรอิสระทั้งหมดภายในชุดข้อมูล; x_{ij} หมายถึงข้อมูลกลุ่มที่ i ตัวแปรอิสระที่ j; $\bar{x}_{ij}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลกลุ่มที่ i ตัวแปรอิสระที่ j; n_{ij} หมายถึง จำนวนข้อมูลในกลุ่มที่ i ตัวแปรอิสระที่ j

4.2 การวัดความแตกต่างของข้อมูลระหว่างกลุ่มด้วยค่า R^2 ค่าของ R^2 อยู่ในช่วง [0, 1] ถ้าค่า R^2 มีค่ามาก แสดงว่าข้อมูลในแต่ละกลุ่มมีลักษณะที่ต่างกันหรือมีประสิทธิผลในการแบ่งกลุ่มดี (Halkidi et al., 2002) สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$RS = \frac{SS_t - SS_w}{SS_t}$$

เมื่อ $SS_t = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{p}(x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ และ $SS_w = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{p}(x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2$

โดยที่ SS_t หมายถึง ผลรวมของผลต่างกำลังสองของข้อมูลทั้งหมด; SS_w หมายถึง ผลรวมของผลต่างกำลังสองทุกข้อมูลภายในกลุ่ม; k หมายถึง จำนวนกลุ่มผู้บริโภคที่แบ่งได้ทั้งหมด; p หมายถึง จำนวนตัวแปรอิสระทั้งหมด; x_{ij} หมายถึง ข้อมูลกลุ่มที่ I ตัวแปรอิสระที่ j; $\bar{x}_j$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยข้อมูลในตัวแปรอิสระที่ j; $\bar{x}_{ij}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลกลุ่มที่ i ตัวแปรอิสระที่ j

5. คัดเลือกวิธีการที่มีประสิทธิผลดีที่สุดในข้อ4 เพื่อนำกลุ่มผู้บริโภคมาวิเคราะห์ลักษณะประชากรศาสตร์ พฤติกรรมของผู้บริโภค วิถีการดำเนินชีวิต จากนั้นเปรียบเทียบปัจจัยทางการตลาดที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้ออาหารฮาลาลนำเข้าของผู้บริโภคในแต่ละกลุ่มด้วยวิธี ANOVA หรือ Kruskal-Wallis test ขึ้นกับรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูล (กัลยา, 2548)

6. กำหนดผู้บริโภคเป้าหมายและกลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสม

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์กลุ่มปัจจัย

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรวิถีการดำเนินชีวิตจำนวน 20 ตัวแปร พบว่ามีค่าKaiser-Meyer-Olkin (KMO) เป็น 0.870 แสดงว่าตัวแปรในด้านวิถีการดำเนินชีวิตมีความสัมพันธ์กันสูง สมควรนำมาผ่านการวิเคราะห์ปัจจัย และพบว่าสามารถลดจำนวนตัวแปรลงเป็น 3 กลุ่มปัจจัย (Table 1) ที่มีค่า Factor loading ภายใต้กลุ่มปัจจัยเดียวกันสูงในช่วง 0.3-0.9 และแต่ละกลุ่มปัจจัยมีค่า Eigenvalue มากกว่า 1 โดยกลุ่มปัจจัยแรกคือ “วิถีชีวิตแบบให้ความสำคัญกับสุขภาพและมาตรฐานฮาลาล” ซึ่งได้แก่ การนิยมบริโภคอาหารจำพวกออร์แกนิกหรือมาจากธรรมชาติ มีไขมันต่ำ หลีกเลี่ยงสารเติมแต่ง และให้ความสำคัญกับตราฮาลาลบนบรรจุภัณฑ์ กลุ่มปัจจัยที่สองคือ “วิถีชีวิตแบบการเข้าสังคมและเปิดรับสิ่งใหม่” นิยมบริโภคตามกระแสและชอบรับประทานอาหารชนิดใหม่ๆ เข้าร่วมเทศกาลและงานเลี้ยงเป็นประจำ และกลุ่มปัจจัยสุดท้ายคือ “วิถีชีวิตแบบเชื่อใจในอาหารนำเข้าและมาตรฐานฮาลาลใดๆ” ได้แก่ ชอบเลือกซื้ออาหารพิเศษเพื่อเป็นของฝากผู้อื่น เชื่อใจสินค้านำเข้า มีความอ่อนไหวต่อราคาสินค้า และบุคคลรอบข้างมีอิทธิพลต่อการเลือกซื้ออาหาร

Table 1 Factor groups of lifestyle of Jakarta's consumers resulted from factor analysis

Group	Group Characteristic	Eigenvalue	Lifestyle	Factor loading
1	Health and Halal-concerned	4.226	- Health concerned	0.875
			- Carefully read the label before buying	0.776
			- Willing to pay for more quality	0.615
			- Routinely attend islamic recitation	0.382
2	Socialize and Open-minded	2.673	- Enjoy every festival	0.798
			- Enjoy the party after work	0.796
			- Enjoy eating out	0.647
			- Enjoy new style of foods	0.573
3	Trust imported foods	2.597	- Relatives influence to purchasing	0.731
			- Trust imported foods	0.694
			- Trust any halal label	0.602
			- Buy specialty foods for others	0.376
			- Price sensitive	0.357

การเปรียบเทียบประสิทธิผลในการแบ่งกลุ่มผู้บริโภค

ผลการเปรียบเทียบวิธีแบ่งกลุ่มผู้บริโภคระหว่างวิธี K-means clustering และวิธี Two step cluster analysis พบว่า วิธี Two step cluster analysis เป็นวิธีการแบ่งกลุ่มที่ดีกว่า (Table 2) โดยมีค่า RMSSTD ต่ำกว่า ในขณะที่มีค่า R^2 สูงกว่าวิธี K-means clustering ดังนั้น จะนำผลการแบ่งกลุ่มผู้บริโภคจากวิธี Two step cluster analysis ไปใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของผู้บริโภคต่อไป

Table 2 Comparison of the effectiveness of the clustering techniques

Clustering techniques	RMSSTD	R^2
1. K-means clustering	0.656	0.258
2. Two step cluster analysis	0.650	0.273

RMSSTD Root Mean Square Standard Deviation

คุณลักษณะเฉพาะของกลุ่มผู้บริโภค

ผู้บริโภคทั้งสองกลุ่ม มีลักษณะทางประชากรศาสตร์และพฤติกรรมที่แตกต่างกัน (Table 3) ดังนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มรักสุขภาพและอนุรักษ์นิยม มีจำนวน 236 คน (61.1%) มีอายุประมาณ 23-40 ปี สมรสแล้วและมีบุตร การศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีขึ้นไป ทำงานในหน่วยงานเอกชน มีรายได้ครอบครัวมากกว่า 3,000,000 รูเปียห์ คิดเป็นเงินไทย 7,760 บาท (1 รูเปียห์ ประมาณ 0.0026 บาท) ครอบครัวมีเด็กแต่ไม่มี

ผู้สูงอายุ ผู้บริโภคนิยมบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพและได้มาตรฐานเป็นหลัก แต่ไม่ชอบเข้าสังคมหรือทำตามกระแสและไม่นิยมลองรับประทานอาหารชนิดใหม่ๆ

กลุ่มที่ 2 กลุ่มวัยรุ่นและเปิดรับสิ่งใหม่ มีจำนวน 150 คน (38.9%) ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง โสด อายุน้อยกว่า 23 ปี เป็นกลุ่มนักเรียนและนักศึกษา มีรายได้ครอบครัวประมาณ 1,500,000-3,000,000 รูเปียห์ คิดเป็นเงินไทยประมาณ 3,880-7,760 บาท ครอบครัวไม่มีเด็กและผู้สูงอายุ ชอบเข้าสังคมและเปิดรับสิ่งใหม่มากที่สุดและไม่เน้นบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ

Table 3 Result of two step cluster of consumers in Jakarta

Attributes		Cluster 1 n=236	Cluster 2 n=150	Importance Level
Marital Status	Single	20.8%	99.3%	1.00
	Married (No Child)	12.7%	0.7%	
	Married (Child)	66.5%	0.0%	
Age	Less than 23 years old	0.8%	66.7%	0.95
	23-40 years old	66.1%	32.0%	
	More 40 years old	33.1%	1.3%	
Occupation	Housewife/Retied	10.2%	1.3%	0.68
	Government Official	19.5%	0.7%	
	Company Employee	69.9%	48.0%	
	Students	0.4%	50.0%	
Household Revenue (Indonesian Rupia/month)	Less than 1,500,000 IDR	0.4%	28.0%	0.65
	1,500,000-3,000,000 IDR	18.2%	50.0%	
	More than 3,000,000 IDR	81.4%	22.0%	
Have children who less than 15 years old	Yes	58.5%	18.0%	0.29
	No	41.5%	82.0%	
Education	High school	25.4%	60.0%	0.24
	Bachelor Degree	59.7%	39.3%	
	Master Degree and above	14.8%	0.7%	
Home Location	Resident	93.2%	78.0%	0.10
	Countryside	6.8%	22.2%	
Average factor score of health and halal-concerned group		0.151	-0.238	0.08
Sex	Male	54.7%	38.7%	0.05
	Female	45.3%	61.3%	
Average factor score of trust imported foods group		0.095	-0.149	0.04
Religion	Islam	97.0%	94.0%	0.02

Attributes		Cluster 1 n=236	Cluster 2 n=150	Importance Level
Others		3.0%	6.0%	
Average factor score of socialize and open-minded group		-0.043	0.067	0.01
Have adults who over 55 years old	Yes	45.8%	39.3%	0.01
	No	53.8%	60.7%	

Note: * Average factor score across every consumer in the cluster.

** Importance level shows the relative importance of each attribute.

ปัจจัยด้านการตลาดที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้ออาหารฮาลาลนำเข้า

ผลการเปรียบเทียบระดับความสำคัญของปัจจัยด้านการตลาดที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้ออาหารฮาลาลนำเข้าในผู้บริโภคแต่ละกลุ่มในด้านผลิตภัณฑ์ ราคา ช่องทางการจัดจำหน่าย และการส่งเสริมการตลาดด้วยวิธี Kruskal-Wallis test เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ พบว่า ผู้บริโภคกลุ่มรักสุขภาพและอนุรักษ์นิยมให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านราคาและด้านผลิตภัณฑ์ในระดับสูงกว่ากลุ่มวัยรุ่นและเปิดกว้าง ($p \leq 0.05$)

ทั้งนี้พบเพิ่มเติมว่า ผู้บริโภคกลุ่มรักสุขภาพและอนุรักษ์นิยม (Table 4) ให้ความสำคัญในระดับสูงมากกับการมีโลโก้ฮาลาลที่บรรจุภัณฑ์ คุณค่าโภชนาการของผลิตภัณฑ์ บริษัทผู้ผลิตใส่ใจในสวัสดิภาพสัตว์ ยินดีที่จะจ่ายเพื่อสินค้าที่มีคุณภาพสูง สุขอนามัยของสถานที่จัดจำหน่ายดี และสถานที่จัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์นำเข้ามีชื่อเสียง ต้องการให้มีการแสดงรายละเอียดสินค้าบนโบรชัวร์ และชอบสินค้าลดราคา

Table 4 Important marketing mix subfactors of Health and Conservative consumers

Health and Conservative consumer			
Product	Price	Place	Promotion
- Labeling of Halal - Nutrition value - Concern about animal welfare	- Reasonable price versus quality	- Hygienic place - Good reputation about high quality imported product - Managing product category	- Has brochure of product detail - Price reduction

สำหรับกลุ่มวัยรุ่นและเปิดรับสิ่งใหม่นั้น (Table 5) ใส่ใจเหมือนกับกลุ่มแรกคือ ยินดีที่จะจ่ายเพื่อสินค้าที่มีคุณภาพ มีการแสดงรายละเอียดสินค้าบนโบรชัวร์ สุขอนามัยของสถานที่จัดจำหน่าย การมีโลโก้ฮาลาลที่บรรจุภัณฑ์ คุณค่าโภชนาการ และการแสดงบนฉลาก ส่วนที่แตกต่างคือ เน้นการมีรสชาติอร่อยถูกปาก และต้องการให้สถานที่จำหน่ายอยู่ใกล้บ้านหรือสำนักงาน และชอบการโปรโมทผ่านการโฆษณา

Table 5 Important marketing mix subfactors of Young and Open-minded consumers

Young and Open-minded consumers			
Product	Price	Place	Promotion
- Labeling of Halal - Good taste - Nutrition value	- Reasonable price versus quality	- Hygienic place - Location close to home or office - Good reputation about	- Has brochure of product detail - Advertisement

Young and Open-minded consumers			
Product	Price	Place	Promotion
		high quality imported product	

การวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยย่อยในด้านผลิตภัณฑ์ ราคา ช่องทางการจัดจำหน่าย และการส่งเสริมการตลาดของผู้บริโภคสองกลุ่ม (Table 6) พบว่าผู้บริโภคกลุ่มรักสุขภาพและอนุรักษ์นิยมใส่ใจและพิถีพิถันในเรื่องคุณค่าทางโภชนาการ สวัสดิภาพสัตว์ ฉลากโภชนาการ กระบวนการผลิตและบรรจุภัณฑ์เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อาหารปราศจากสารเจือปนหรือสารปรุงแต่ง ราคาเหมาะสมกับคุณภาพ มีสถานที่จอดรถสะดวกและปลอดภัย สนใจโบรชัวร์รายละเอียดผลิตภัณฑ์ ชอบการลดราคาและของแถมในระดับที่สูงกว่าผู้บริโภคกลุ่มวัยรุ่นและเปิดรับสิ่งใหม่ ทั้งนี้ผู้บริโภคกลุ่มรักสุขภาพและอนุรักษ์นิยมซึ่งมีความพิถีพิถัน รายได้สูง และเต็มใจจะจ่ายเพื่อคุณภาพที่สูงกว่า จะเป็นผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายหลักของอาหารฮาลาลจากประเทศไทย ซึ่งสำหรับชาวจาการ์ตารับรู้ว่ามีชื่อเสียงที่ดีมากในด้านเทคโนโลยีการผลิต รสชาติดี ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูง และบรรจุภัณฑ์ทันสมัย (Farabi and Chaveesuk, 2015)

ในขณะที่ถ้าต้องการเข้าถึงกลุ่มเป้าหมายรอง คือ กลุ่มวัยรุ่นและเปิดรับสิ่งใหม่นั้นควรสร้างความแตกต่างในตัวสินค้าและบรรจุภัณฑ์ รวมถึงฉลาก มีรสชาติเหมาะสมกับวัย ในราคาเหมาะสมกับคุณภาพ ใช้การส่งเสริมการตลาดด้านการโฆษณาผ่านสื่อออนไลน์ มีการแนะนำให้ทดลองชิมสินค้า เพื่อให้ผู้บริโภครับรู้ถึงรสชาติ ความแปลกใหม่ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์มากขึ้น

Table 6 Comparison of the importance on marketing mix subfactors between two consumer groups

Attribute	Health and Conservative	Young and Open-minded
Product		
Nutrition value	8.44 ± 1.05 a	8.01 ± 1.30 b
No food additive	8.15 ± 1.52 a	7.46 ± 1.93 b
Eco friendly packaging	8.17 ± 1.17 a	7.56 ± 1.73 b
Labeling of nutrition fact	8.26 ± 1.20 a	7.77 ± 1.58 b
Eco friendly Process	8.07 ± 1.40 a	7.53 ± 1.73 b
Company concern about an animal welfare	8.38 ± 1.31 a	7.75 ± 1.84 b
Price		
Reasonable price versus quantity	7.89 ± 1.74 a	7.48 ± 1.85 b
Place		
Safe and convenient car parking	7.85 ± 1.52 a	7.42 ± 1.89 b
Promotion		
Has brochure of product detail	7.86 ± 1.40 a	7.55 ± 1.51 b
Price reduction	7.79 ± 1.55 a	7.43 ± 1.77 b
Provide premium products	7.68 ± 1.55 a	7.35 ± 1.56 b

Numbers in the same row followed by the different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

สรุป

การแบ่งกลุ่มผู้บริโภคชาวจาการ์ตาด้วยวิธี Two step cluster analysis ได้ผู้บริโภคจำนวน 2 กลุ่มคือ กลุ่มรักสุขภาพและอนุรักษ์นิยมและกลุ่มวัยรุ่นและเปิดรับสิ่งใหม่ ผู้บริโภคกลุ่มรักสุขภาพและอนุรักษ์นิยมเป็นกลุ่มเป้าหมายหลักสำหรับอาหารฮาลาลนำเข้าจากประเทศไทย ซึ่งจัดเป็นสินค้าพรีเมียมสำหรับตลาดเฉพาะกลุ่ม ผู้บริโภคกลุ่มนี้มีรายได้สูง สมรสและมีบุตร ใส่ใจในรายละเอียดตัวผลิตภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์ สิ่งแวดล้อมที่มีคุณภาพ ดังนั้นกลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสม คือ เน้นตลาดอาหารฮาลาลพรีเมียม มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีประโยชน์ต่อสุขภาพ เช่น ใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติหรือออร์แกนิก ไขมันต่ำ หรือมีส่วนผสมของผักและผลไม้ที่ให้ประโยชน์ต่อร่างกาย ปราศจากสิ่งเจือปน และมีระบบการผลิตและบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสื่อสารคุณลักษณะพรีเมียมเหล่านี้ให้กับผู้บริโภคผ่านฉลากและโบรชัวร์ จัดจำหน่ายในซุปเปอร์มาร์เก็ตพรีเมียมในจาการ์ตาและปริมณฑล มีที่จอดรถปลอดภัยและเพียงพอ มีสุขอนามัยและชื่อเสียงในการวางขายผลิตภัณฑ์นำเข้าในระดับสูง ได้แก่ Hero, The Food Hall, Ranch Market, Lucky และ Kemchicks ทั้งนี้ผู้ประกอบการควรร่วมมือกับผู้นำเข้าในการจัดการสื่อสารทางการตลาด เช่น การจัดสินค้าเป็นเซตในราคาพิเศษ การให้ของแถมเป็นสินค้าพรีเมียม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงต่างประเทศ. 2556. **สาธารณรัฐอินโดนีเซีย**. แหล่งที่มา: http://www.mfa.go.th/main/th/world/70/10271-สาธารณรัฐอินโดนีเซีย.html., 18 กรกฎาคม 2558

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2549. **การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล**. พิมพ์ครั้งที่ 7. บริษัทธรรมสาร จำกัด, กรุงเทพฯ.

ฝ่ายวิจัยธุรกิจ. 2556. **ตลาดอาหารฮาลาลในอินโดนีเซีย...โอกาสรออยู่ข้างหน้า**. ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้าแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

พิมพ์รวี ทังสุบุตร. 2554. **การจำแนกกลุ่มผู้รับประทานอาหารสุขภาพโดยใช้ทัศนคติและปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกรับประทานอาหารสุขภาพ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม. 2556. **รายงานการศึกษาพฤติกรรมผู้บริโภคเชิงลึกในตลาดอาเซียน+6 โดยเฉพาะสาขาธุรกิจอาหารและสินค้าตกแต่งบ้าน**. แหล่งที่มา: http://issuu.com/nichananprempipat/docs/report_consumer_behavior., 31 ตุลาคม 2558.

ศูนย์บริการข้อมูลธุรกิจไทยในอินโดนีเซีย. 2555. **ข้อมูลประเทศอินโดนีเซีย**. แหล่งที่มา: http://www.thaibizindonesia.com/th/info-indonesia/geography.php., 2 มิถุนายน 2558.

ศูนย์บริการข้อมูลระหว่างประเทศ. 2556. **โอกาสสินค้าไทยใน "ตลาดอินโด"**. แหล่งที่มา: http://www.mfa.go.th/business/th/news/84/39231., 12 ธันวาคม 2558.

ศูนย์วิทยาศาสตร์ฮาลาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2556. **บทบาทของฮาลาลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ**. แหล่งที่มา: http://www.halalscience.org/th/main2010/index.php., 2 มิถุนายน 2558

Eleni K., Konstantinos, P., Maria, G.S. and Christos, B. 2013. **Consumer' attitudes towards fisheries products**: Procedia technology 8 (2013): 90-96.

Farabi, A and R. Chaveesuk. 2015. **Lifestyle, Attitude and Consumption Behavior of Consumers in Jakarta towards Imported Juice Products, pp. 1114-1120**. *In* The Proceedings of 53rd Kasetsart University Annual Conference (Subject: Agro-Industry). 3-6 February 2015, Kasetsart University, Bangkok.

Halkidi, M., Y. Batistakis and M. Vazirgiannis. 2002. **Clustering validity checking methods: Part II**. SIGMOD Rec.31 (3): 19-27.

ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์สมูทตี้ผลไม้แช่แข็ง จากมูลนิธิโครงการหลวงของผู้บริโภค ในเขตกรุงเทพมหานคร

Factors Affecting Consumer's Buying Decision of Smoothie Products from The Royal Project Foundation's Frozen Fruit in Bangkok Metropolis

ณัฐนรี รังสิโยภาส[1*] และ รวิพิมพ์ ฉวีสุข[1]

Nutnaree Rangsiyopas[1*] and Ravipim Chaveesuk[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภค และสร้างแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกเพื่อระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์สมูทตี้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง พบว่าผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายที่ซื้อผลิตภัณฑ์มีอายุเฉลี่ย 33 ปี เป็นพนักงานบริษัทและข้าราชการ มีรายได้ตั้งแต่ 10,000 บาทขึ้นไป การบ่งชี้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้สามารถกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดให้กับทางผู้ประกอบการสมูทตี้ผลไม้จากมูลนิธิโครงการหลวงได้ดังนี้ กำหนดให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ระดับพรีเมียม มีผลไม้หลากหลายให้ผู้บริโภคได้เลือกและผู้บริโภคสามารถเลือกระดับความหวานได้ สถานที่จัดจำหน่ายควรเป็นระดับพรีเมียม มีการตกแต่งร้านให้ทันสมัย และระบุว่าใช้ผลไม้จากโครงการหลวงผ่านป้ายหรือสัญลักษณ์โครงการหลวงเพื่อสร้างความเชื่อถือในด้านความปลอดภัย กลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสมสำหรับมูลนิธิโครงการหลวง ได้แก่ สื่อสารให้ผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของผลไม้แช่แข็งของมูลนิธิโครงการหลวง สร้างการจดจำตราสินค้าของมูลนิธิโครงการหลวงในด้านการมีส่วนช่วยสนับสนุนชุมชน ประชาสัมพันธ์ให้ผู้บริโภคทราบถึงความแตกต่างระหว่างผลไม้แช่แข็งจากโครงการหลวงและผลไม้แช่แข็งจากแหล่งอื่นๆ และอนุญาตให้ผู้ประกอบการสามารถใช้ตราสัญลักษณ์โครงการหลวงได้ หากมีการใช้วัตถุดิบผลไม้แช่แข็งดังกล่าว

ABSTRACT

This research was to study consumer behavior and attitude towards smoothie product from frozen fruit of the Royal Project Foundation (RPF). Logistic regressions were built to identify factors affecting consumer buying decision for smoothie product. Target consumers were adult with 33 years old on average and work firm employees that have income more than 10,000 baht. Factors affecting consumer buying decision for smoothie were identified in this research used to develop marketing strategies for the smoothie store and the RPF. Marketing strategies for the smoothie store were to set product position as premium, to provide a variety of fruits, to encourage customer's ability to choose smoothie sweetness level, to choose premium location outlet and provide modern style store/kiosk and to display safe frozen fruit from the RPF being use through sign or RPF symbol. Marketing strategies for the RPF were to communicate a trust in quality of its fruit, to build brand awareness in term of corporate supporting community, to promote about the different between the RPF and the others and to allow a use of the RPF's logo if its frozen fruit being used.

Key Words: smoothie, The Royal Project Foundation, logistic regression, marketing strategy, consumer behavior

*Corresponding author; e-mail address: ohlanla16@gmail.com

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Agro-Industrial Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปี 2557 ยอดจำหน่ายผลผลิตของโครงการหลวงมีมูลค่าสูงถึง 900 ล้านบาท ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2556 ร้อยละ 15 และยอดขายดังกล่าวมาจากการขายผลไม้สดและแปรรูปสูงถึงร้อยละ 50 ผลไม้จากโครงการหลวงถือว่ามีคุณภาพสูง เนื่องจากโครงการหลวงมีการนำมาตรฐานอาหารปลอดภัยของประเทศไทยและมาตรฐานสากลมาใช้ รวมถึงระบบการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวภายใต้ระบบห่วงโซ่ความเย็น (cold chain) ในการคัดและบรรจุผลผลิต เก็บรักษา และขนส่งผลผลิตไปยังลูกค้าต่างๆ เพื่อให้ผลผลิตเหล่านั้นมีความสด สะอาด และปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากที่สุด (มูลนิธิโครงการหลวง, 2555) สำหรับกระบวนการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคจะเริ่มจากการตระหนักถึงความต้องการ โดยความต้องการของผู้บริโภคคือแรงผลักดันที่กระตุ้นให้ผู้บริโภคเกิดความอยากซื้อ ต่อมาคือการเสาะแสวงหาข่าวสาร เพื่อช่วยในการตัดสินใจซื้อสินค้านั้นๆ และต้องมีการประเมินทางเลือก โดยผู้บริโภคประเมินทางเลือกขั้นพื้นฐานจากความโดดเด่น ความเข้าใจในตราสินค้า และคุณลักษณะอื่นๆ และการตัดสินใจซื้อ คือเมื่อผู้บริโภคเลือกซื้อสินค้าแล้ว สามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องความต้องการได้ และพฤติกรรมหลังการซื้อผู้บริโภคจะเป็นตัวกำหนดเองว่าการตัดสินใจซื้อนั้นถูกต้องหรือไม่ และถ้าหากผู้บริโภคพึงพอใจก็จะแชร์ประสบการณ์ดีๆ ให้กับคนรอบข้าง และที่สำคัญอาจจะกลายมาเป็นผู้บริโภคที่ภักดีต่อตราสินค้านั้นๆก็เป็นได้ (ศักดิ์โสภณ, 2553) จากการศึกษาพฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภคที่ซื้อสินค้าจากมูลนิธิโครงการหลวง พบว่าผู้บริโภคส่วนใหญ่มีทัศนคติที่ดีต่อการซื้อสินค้าจากทางโครงการหลวง โดยเฉพาะในเรื่องของความเหมาะสมกับราคา และปัจจัยทางการตลาดที่มีความสำคัญต่อการเลือกซื้อสินค้าของผู้บริโภคจากโครงการหลวงมากที่สุด ได้แก่ คุณภาพ ความสะอาดปลอดภัย และฉลาก (พรทิพย์, 2550) โครงการหลวงมีนโยบายเพิ่มมูลค่าผลไม้สดที่เหลือขาย ด้วยการแปรรูปเป็นผลไม้แช่แข็ง ซึ่งวิธีการแปรรูปเป็นผลไม้แช่แข็งไม่มีการใช้ความร้อนในการแปรรูป ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านโภชนาการและทางด้านประสาทสัมผัสน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแปรรูปอื่นๆ เช่น การกวน การอบแห้ง เป็นต้น (Apassorn and Sanguansri, 2012) ในปี 2558 ตลาดสมูทตี้ผลไม้ของโลกนั้นมีมูลค่าสูงถึง 9,000 ล้านดอลลาร์ (Global Industry Analysts, 2015) จากการเป็นสังคมที่เร่งรีบและการตระหนักถึงสุขภาพของผู้บริโภค ผู้บริโภคจะเลือกบริโภคผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพที่ผ่านขั้นตอนกระบวนการผลิตให้น้อยที่สุด สามารถคงคุณค่าทางโภชนาการไว้ได้สูงที่สุด (องค์อาจ, 2550) สำหรับตลาดเครื่องดื่มสมูทตี้เพื่อสุขภาพในเมืองไทย มีมูลค่าตลาดประมาณ 840 ล้านบาทในปี 2557 และมีแนวโน้มที่จะเติบโตขึ้นอีกประมาณร้อยละ 20 ต่อปี ในขณะที่การแข่งขันในตลาดมีความรุนแรงมากขึ้นและผู้บริโภคมีความต้องการสินค้าที่มีคุณภาพและมีความปลอดภัยมากขึ้น (แฟรนไชส์ไทย, 2557) สำหรับปัจจัยทางการตลาดที่มีผลต่อธุรกิจเครื่องดื่มสมูทตี้ ที่สำคัญที่สุด คือ คุณภาพของวัตถุดิบ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากลักษณะเฉพาะของเครื่องดื่มสมูทตี้จะต้องมีความสด สะอาดและรสชาติคงที่ (ชุมทางอาชีพ, 2556) ดังนั้นการผลิตเครื่องดื่มสมูทตี้ด้วยวัตถุดิบผลไม้ที่มีความน่าเชื่อถือทั้งในด้านคุณภาพและความปลอดภัย เช่น ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง จะช่วยเพิ่มมูลค่าและสร้างความน่าเชื่อถือให้แก่ตราสินค้าของผู้ประกอบการเครื่องดื่มสมูทตี้ได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภคต่อสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง และระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้ดังกล่าว เพื่อกำหนด

กลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับผู้ประกอบการสมูทตี้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวงและสำหรับมูลนิธิโครงการหลวง

อุปกรณ์และวิธีการ

1.การเก็บข้อมูล

1.1 รวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถามซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลพฤติกรรมการบริโภคสมูทตี้ของผู้บริโภค ปัจจัยทางการตลาดที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อสมูทตี้ของผู้บริโภค ทัศนคติของผู้บริโภคต่อสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวงและข้อมูลด้านประชากรศาสตร์จากผู้บริโภคที่เคยบริโภคผลิตภัณฑ์สมูทตี้จากผลไม้แช่แข็ง ซึ่งมีอายุ 15 ปีขึ้นไป ที่อาศัยอยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร จำนวน 400 คน

1.2 แบ่งกลุ่มผู้บริโภคตัวอย่างเป็น 2 กลุ่ม จากคำถามในแบบสอบถามว่าจะซื้อหรือไม่ซื้อสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง ได้แก่ ผู้บริโภคเป้าหมาย คือ ผู้บริโภคที่จะซื้อสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง จำนวน 224 คน และกลุ่มผู้บริโภคที่ไม่ใช่เป้าหมาย คือ ผู้บริโภคที่จะไม่ซื้อหรือไม่แน่ใจว่าจะซื้อสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง จำนวน 176 คน

1.3 วิเคราะห์ข้อมูลด้านประชากรศาสตร์และพฤติกรรมการบริโภคสมูทตี้ โดยใช้ความถี่และร้อยละ

1.4 จัดข้อมูลให้อยู่ในรูปตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม

1.4.1 ตัวแปรอิสระ จำนวน 36 ตัวแปร ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของผู้บริโภค ปัจจัยทางการตลาด ทัศนคติของผู้บริโภคต่อสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง และลักษณะทางประชากรศาสตร์

1.4.2 ตัวแปรตาม จำนวน 1 ตัวแปรซึ่งมีผลลัพธ์ 2 ประการ ได้แก่ เลือกซื้อสมูทตี้จากผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง และไม่สนใจซื้อสมูทตี้จากผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง

1.5 แบ่งข้อมูล 400 ค่าออกเป็น 2 ส่วนโดยใช้อัตราส่วน 60 : 40

1.5.1 ชุดเรียนรู้ (training set) จำนวน 240 ค่า (60%) สำหรับการสร้างแบบจำลอง

1.5.2 ชุดทวนสอบ (validating set) จำนวน 160 ค่า (40%) สำหรับการตรวจสอบความสามารถในการใช้งานทั่วไป

1.6 สร้างแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม โดยเปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกที่ใช้ตัวแปรอิสระทุกตัว วิธี Forward และวิธี Backward โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics 20

1.6.1 เปรียบเทียบความสามารถในการจำแนกกลุ่มถูกต้องของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\% \text{ Correct Classification} = \frac{A}{B} \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่ A คือ จำนวนชุดตัวอย่างที่แบบจำลองให้ผลการจำแนกผู้บริโภคตรงกับผู้ทดสอบ

B คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

1.6.2 ตรวจสอบความเหมาะสมและน่าเชื่อถือของแบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก โดยการตรวจสอบข้อสมมติทางสถิติ ได้แก่ ตรวจสอบว่าตัวแปรนำเข้าสมควรอยู่ในแบบจำลองหรือไม่ด้วย Wald Test ซึ่งต้องปฏิเสธสมมติฐานหลัก ตรวจสอบแบบจำลองมีความเหมาะสมกับข้อมูลด้วย Hosmer and Lemeshow Test ซึ่งต้องไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ตรวจสอบว่ามีค่าสังเกตที่มีผลกระทบสูงหรือค่าผิดปกติหรือไม่ด้วยค่า Cook's Distance ซึ่งค่าปกติต้องมีค่าไม่เกิน 1 (สวัสดิ์ชัย, 2548)

1.6.3 ระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อโอกาสในการซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง โดยใช้ค่า Odd Ratio โดยค่า Odd Ratio มากกว่า 1 หมายถึง เมื่อค่าตัวแปรอิสระเพิ่มขึ้น โอกาสที่ผู้บริโภคจะเลือกซื้อผลิตภัณฑ์สมูทตี้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับ Odd Ratio น้อยกว่า 1 หมายถึง เมื่อค่าตัวแปรอิสระเพิ่มขึ้น โอกาสดังกล่าวจะลดลง และ Odd Ratio เท่ากับ 1 หมายถึง การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของตัวแปรอิสระไม่ส่งผลต่อกระทบต่อโอกาสดังกล่าว

1.7 กำหนดกลยุทธ์ทางการตลาดสำหรับผู้ประกอบการสมูทตี้ผลไม้จากมูลนิธิโครงการหลวงและมูลนิธิโครงการหลวง

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ข้อมูลทางด้านประชากรศาสตร์ของผู้บริโภค

ผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายซึ่งมีจำนวน 224 คน ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิงมากกว่าเพศชาย มีอายุเฉลี่ยเท่ากับ 33 ปี โสดร้อยละ 67 มีการศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีและสูงกว่าร้อยละ 89 เป็นพนักงานบริษัทและข้าราชการร้อยละ 67 และมีรายได้เฉลี่ยต่อเดือนสูงกว่า 10,000 บาท ร้อยละ 87 ในขณะที่ผู้บริโภคที่ไม่ใช่กลุ่มเป้าหมายมีจำนวน 176 คน เป็นเพศหญิง มีอายุเฉลี่ยเท่ากับ 34 ปี โสดร้อยละ 69 มีการศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีและสูงกว่าร้อยละ 81 เป็นพนักงานบริษัทและข้าราชการร้อยละ 71 และมีรายได้เฉลี่ยต่อเดือนอยู่ไม่เกิน 30,000 บาท ร้อยละ 76 และยังมีผู้บริโภคที่เงินเดือนสูงกว่า 40,000 บาทอีกร้อยละ 17

2. พฤติกรรมการบริโภคเครื่องดื่มสมูทตี้ผลไม้ของผู้บริโภค

ผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายนิยมบริโภคเครื่องดื่มสมูทตี้ที่ทำจากสตรอเบอร์รี่มากที่สุด ร้อยละ 17 รองลงมาคือ กีวี่และส้ม ร้อยละ 11 และ ร้อยละ 9 ตามลำดับ ในขณะที่ผู้บริโภคไม่ใช่เป้าหมายนิยมเครื่องดื่มสมูทตี้ที่ทำจากสตรอเบอร์รี่เช่นกัน กีวี่และส้มเช่นกัน

กลุ่มผู้บริโภคที่เป็นกลุ่มเป้าหมายและไม่ใช่เป้าหมายส่วนมากบริโภคสมูทตี้สัปดาห์ละ 1-2 ครั้ง (Table1) กลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายจะซื้อสมูทตี้ช่วงวันธรรมดา (วันจันทร์-ศุกร์) มากที่สุด ในขณะที่กลุ่มผู้บริโภคที่ไม่ใช่เป้าหมายซื้อสมูทตี้ในวันธรรมดาและวันเสาร์อาทิตย์พอๆกัน อย่างไรก็ตามกลุ่มผู้บริโภคทั้ง 2 กลุ่ม จะซื้อสมูทตี้ผลไม้จากห้างสรรพสินค้ามากที่สุด รองลงมาคือซื้อจากร้านค้าในบริเวณสถานที่ทำงาน และจากร้านค้าในแหล่งชุมชน กลุ่มผู้บริโภคทั้ง 2 กลุ่มบริโภคเครื่องดื่มสมูทตี้ผลไม้เพื่อช่วยลดความกระหายน้ำ คลายร้อน ชอบรสชาติของสมูทตี้ และชอบบริโภคผลไม้ตามลำดับ

Table 1 Consumer Behavior of the fruit smoothie product

Behavior	Detail	Target (%)	Non Target (%)
1.Frequency of smoothie consumption	1-2 times/week	68.30	78.41
	3-4 times/week	20.98	14.20
	5-6 times/week	8.48	4.55
	More than 6 times/week	2.23	2.84
2.Day to buy smoothie	Monday-Friday	50.00	44.32
	Saturday-Sunday	29.46	40.34
	Holiday	12.95	11.36
	The Others	7.14	3.98
3.Place for buying smoothie	Department Store	27.95	32.80
	Academy	8.41	5.79
	Shop in the community	12.73	12.86
	Exhibition	6.59	4.50
	Shop near the office	14.32	14.79
	BTS/MRT/Bus	5.91	3.22
	Market	10.23	7.72
	Hypermarket	4.77	4.18
	Supermarket	3.41	3.22
	Convenience Store	5.68	10.93
4.The reason that consumer choose drink smoothie	Reduce thirst	31.70	31.82
	Like smoothie taste	24.11	25.57
	Like having some fruits	20.54	21.59
	Smoothie color	5.36	4.55
	For their health	8.04	10.80
	Avoid caffeine beverage	8.93	5.68
	Others	1.34	0.00

กลุ่มผู้บริโภคที่เป็นกลุ่มเป้าหมายจะเลือกซื้อเครื่องดื่มสมูทตี้ทั่วไปในราคาต่ำสุด 12 บาทและสูงสุด 140 บาท โดยราคาเฉลี่ยเท่ากับ 48 บาท ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 23 บาท และมีช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% ของราคาอยู่ระหว่าง 46-52 บาท ในขณะที่ผู้บริโภคที่ไม่ใช่กลุ่มเป้าหมายจำนวน 3 คน ยินดีที่จะซื้อสมูทตี้ใน

ราคา 140-250 บาท แต่ส่วนใหญ่จะซื้อในราคา 12-120 บาท มีโอกาสสูงมากที่ผู้บริโภคจำนวน 3 คนนั้นซื้อสมูทตี้จากผลไม้แช่แข็งนำเข้าในร้านอาหารหรือโรงแรมระดับพรีเมียมโดยคิดว่ามีคุณภาพสูงกว่าผลไม้แช่แข็งจากโครงการหลวง (Table2)

Table 2 Price distribution for consumer

Price of the smoothie per cup (Baht)	Target Consumer	Non Target Consumer
Minimum price	12	12
Maximum price	140	250
Average price	48.25	47.97
Standard Deviation of Price	22.85	27.51
95% of Confidence Interval of Price	(45.26,51.24)	(43.91,52.03)

3. การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยโลจิสติก

การเปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกระหว่างการใช้ตัวแปรอิสระทั้งหมด วิธี Forward และวิธี Backward ในด้านความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มผู้บริโภคและความถูกต้องเหมาะสมของแบบจำลอง (Table 3)

Table 3 Percent correct classification of various logistic regression models

Logistic Regression model	Percent Correct Classification		Model Reliability
	Training Set	Validating Set	
Full Model	78.30	-	Contain Outliers
Forward Method	67.91	65.00	Reliable
Backward Method	74.60	65.63	Reliable

ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกแบบที่ใช้ตัวแปรอิสระทุกตัว มีความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มผู้บริโภคสูงที่สุด แต่มีข้อมูลที่มีอิทธิพลสูง (Outliers) อยู่จำนวนมากและไม่สามารถขจัดทิ้งได้ ส่งผลให้แบบจำลองไม่น่าเชื่อถือ สำหรับแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกวิธี Backward มีความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มผู้บริโภคสูงกว่าวิธี Forward และแบบจำลองทั้งสองน่าเชื่อถือโดยมีข้อสมมติทางสถิติทุกข้อเป็นจริง แบบจำลองการถดถอยโลจิสติกทั้ง 2 แบบเป็นดังนี้

ก. แบบจำลองการถดถอยโลจิสติกวิธี Forward

$$\hat{\pi} = \frac{e^{-5.112+0.369X_3+0.484X_{34}+0.545X_{36}}}{1+e^{-5.112+0.369X_3+0.484X_{34}+0.545X_{36}}} \qquad (2)$$

ข. แบบจำลองการถดถอยโลจิสติกวิธี Backward

$$\hat{\pi} = \frac{e^{-6.262+0.534X_3-0.374X_4+0.410X_6+0.445X_{20}+0.545X_{34}+0.542X_{36}}}{1+e^{-6.262+0.534X_3-0.374X_4+0.410X_6+0.445X_{20}+0.545X_{34}+0.542X_{36}}} \quad (3)$$

โดยที่ $\hat{\pi}$ คือ โอกาสที่ผู้บริโภคเลือกซื้อผลิตภัณฑ์สมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากโครงการหลวง

X_3 = ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ (ความหลากหลายของชนิดผลไม้)

X_4 = ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ (วัตถุดิบนำเข้าจากประเทศอื่นๆ)

X_6 = ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ (สามารถเลือกระดับความหวานได้)

X_{20} = ปัจจัยด้านช่องทางการจัดจำหน่าย (การตกแต่งร้านทันสมัย สวยงาม)

X_{34} = ทัศนคติที่มีต่อผลไม้แช่แข็งจากโครงการหลวง (มีส่วนสนับสนุนชุมชน)

X_{36} = ทัศนคติที่มีต่อผลไม้แช่แข็งจากโครงการหลวง (ใช้สารเคมีในระดับที่ยอมรับได้)

เนื่องจากแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกวิธี Backward นั้นมีความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มผู้บริโภคสูงกว่า จึงใช้ในการบ่งชี้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโอกาสในการซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวง (Table 4)

Table 4 Factors affecting consumer intention to buy fruit smoothie using frozen fruit from The Royal Project Foundation

Factor	Odd Ratios
Variety of fruits available	1.71
Imported raw materials	0.69
Able to choose smoothie sweetness level	1.51
Modern decoration of the shop	1.56
Corporate support community	1.72
Fruit chemicals in production use an acceptable level	1.72

แบบจำลองการถดถอยวิธี Backward บ่งชี้ 6 ปัจจัยที่มีผลกระทบสูง ได้แก่ (1) การมีส่วนช่วยในการสนับสนุนชุมชน จะทำให้ผู้บริโภคมีโอกาสที่จะซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวงเพิ่มขึ้นอีก 72% (2) ถ้าผลไม้วัตถุดิบมีการใช้สารเคมีในระดับที่ยอมรับได้ จะทำให้ผู้บริโภคมีโอกาสที่จะซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้ดังกล่าวเพิ่มขึ้นอีก 72% (3) ถ้าทางผู้ประกอบการมีผลไม้ที่หลากหลายให้ผู้บริโภคเลือก จะทำให้ผู้บริโภคมีโอกาสที่จะซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้ดังกล่าวเพิ่มขึ้นอีก 71% (4) การตกแต่งร้านให้ทันสมัย สวยงาม จะทำให้ผู้บริโภคมีโอกาสที่จะซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้ดังกล่าวเพิ่มขึ้นอีก 56% (5) ถ้าผู้บริโภคสามารถเลือกระดับความหวานได้ ก็จะทำให้ผู้บริโภคมีโอกาสที่จะซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้ดังกล่าวเพิ่มขึ้นอีก 51% และ (6) การใช้วัตถุดิบผลไม้แช่แข็งในประเทศ โดยถ้าผู้ประกอบการเลือกใช้วัตถุดิบผลไม้แช่

แข็งนำเข้า ก็จะทำให้ผู้บริโภคมีโอกาสที่จะซื้อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมูทตี้ดังกล่าวลดลง 69%

สรุป

กลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสมกับกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย โดยผู้ประกอบการสมูทตี้ควรเน้นกลยุทธ์ด้านผลิตภัณฑ์และช่องทางการจัดจำหน่ายมากกว่าด้านอื่นๆ เนื่องจากมีผลให้ผู้บริโภคมีตัดสินใจซื้อเครื่องดื่มสมูทตี้ที่ใช้ผลไม้แช่แข็งจากมูลนิธิโครงการหลวงสูงขึ้น เป็นดังนี้ (1) กลยุทธ์ด้านผลิตภัณฑ์นั้นควรกำหนดเป็นผลิตภัณฑ์พรีเมียมที่เน้นรสชาติที่กลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายชื่นชอบ มีเนื้อผลไม้จริง และมีความหลากหลายของผลไม้ให้เลือก โดยมีสตรอเบอร์รี่ กีวีและส้มเป็นหลัก นอกจากนั้นจะเป็นผลไม้อื่น เช่น เสาวรส แอปเปิ้ล สลับสับเปลี่ยนไปตามฤดูกาล นอกจากนี้ควรมีระดับความหวานให้ผู้บริโภคเลือก เช่น หวานน้อย ปานกลาง หวานมาก หรืออาจจะกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ความหวาน และแสดงข้อมูลให้ชัดเจนว่าผลไม้ที่ใช้เป็นผลไม้ที่ใช้เป็นผลไม้จากโครงการหลวง เช่น ติดป้ายหน้าร้าน ตราสัญลักษณ์การใช้ผลไม้จากโครงการหลวงตามที่ตกลงกัน หรือข้อความระบุที่แก้วหรือถุง (2) กลยุทธ์ด้านสถานที่จัดจำหน่าย ควรเปิดร้านในแหล่งจัดจำหน่ายพรีเมียม เช่น ศูนย์การค้าในย่านธุรกิจหรือชุมชน ที่ทำงานและสถานศึกษา โมเดิร์นเทรดในสาขาที่พรีเมียม และควรมีการตกแต่งร้านให้สวยงามดึงดูดและทันสมัยเหมาะสมกับกลุ่มพนักงานบริษัทและนักศึกษา (3) กลยุทธ์ด้านการส่งเสริมการตลาด ควรใช้วิธีการกระตุ้นการซื้อในช่วงวันหยุด เช่น การลดราคา การซื้อ 1 แถม 1 เป็นต้น สำหรับกลยุทธ์ทางการตลาดที่เหมาะสมสำหรับมูลนิธิโครงการหลวงนั้นควรเน้นกลยุทธ์ด้านการสื่อสารทางการตลาดด้วยการใช้สัญลักษณ์คุณภาพ เช่น มาตรฐานอาหารปลอดภัย, GMP, HACCP เป็นต้น เพื่อให้ผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพของผลไม้แช่แข็งของโครงการหลวง ควรสร้างการจดจำให้กับตราสินค้าของมูลนิธิโครงการหลวงผ่านสื่อต่างๆ เช่น การจัดงานหรือกิจกรรมเพื่อสังคม และการมีส่วนช่วยสนับสนุนชุมชน เป็นต้น เน้นประชาสัมพันธ์โดยการโฆษณาผ่านสื่อต่างๆ เช่น วิทยุ โทรทัศน์ เป็นต้น เพื่อให้ผู้บริโภคได้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างผลไม้แช่แข็งของโครงการหลวงและผลไม้แช่แข็งจากแหล่งอื่นๆ โดยเฉพาะในเรื่องการใช้สารเคมีในระดับที่ยอมรับได้ และสร้างข้อตกลงกับผู้ประกอบการสมูทตี้โดยผู้ประกอบการสามารถใช้ตราสัญลักษณ์โครงการหลวงได้ หากมีการใช้วัตถุดิบผลไม้แช่แข็งจากโครงการหลวง

เอกสารอ้างอิง

ชุมทางอาชีพ. **ปัจจัยที่มีผลต่อธุรกิจเครื่องดื่มสมูทตี้**. แหล่งที่มา: http://www.neonbookmedia.com, 11 ธันวาคม 2558.

มูลนิธิโครงการหลวง. 2555. **ประวัติความเป็นมา**. แหล่งที่มา: http://www.royalprojectthailand.com/about/, 16 พฤศจิกายน 2558.

พรทิพย์ จตุพรพิมล. 2550. **พฤติกรรมและทัศนคติของผู้บริโภคที่ซื้อสินค้าจากสถานที่จัดจำหน่ายผลผลิตมูลนิธิโครงการหลวงในเขตกรุงเทพมหานคร**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

แฟรนไชส์ไทย. 2557. **Mango Mania**. แหล่งที่มา: http://www.thaifranchisecenter.com, 10 พฤศจิกายน 2558.

ศักดิ์โสภณ ดวงแก้ว. 2553. **ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ของชุมนุมสหกรณ์ออมทรัพย์แห่งประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต (การจัดการสาธารณะ), มหาวิทยาลัยบูรพา.

สวัสดิ์ชัย ศรีพนมธนากร. 2548. **การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก**. แหล่งที่มา: http://www.thairenu.com/logistic.htm, 15 สิงหาคม 2549.

Apassorn, S. and S. Charoenrein. 2012. **Freezing characteristics and texture variation after freezing and thawing of four fruit types**. J. Sci. Technol. 34 (5): 517-523.

Global Industry Analysts. **Global smoothie market**. 2015. Available source: http://www.prweb.com/releases/smoothies_market/frozen_mix_smoothie/prweb3808804.htm, 17 August 2015.

Effect of rice flour treated with enzyme hydrolysis and heat-moisture treatment on texture quality and thermal properties of rice cookies

Niramon Whantongkhum[1] and Prissana Suwannaporn[1*]

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effects of rice flour treated with enzyme hydrolysis and heat-moisture treatment on the texture and thermal properties of rice cookies. Rice flour (KDML-105 variety) was treated with enzyme hydrolysis, heat moisture treatment and enzyme hydrolysis followed by heat moisture treatment. Modified rice flour was applied in a limited water dough system (rice cookies model). High crystalline flour in a limited water system was expected to cause incomplete gelatinization which influenced its textural quality and thermal properties. All cookies made from modified rice flour had a higher spread ratio and less thickness than the native cookie. However, heat-moisture treatment could help lowering its spread ratio and increasing in diameter and thickness compared to only enzyme treatment. The crispness and hardness of rice cookies made from modified rice flour were higher than that of native rice cookie. Gelatinize transition temperature, temperature range and enthalpy were increased in modified rice cookies. The overall results showed that hydrolyzed-HMT rice flour could improve both textural qualities and thermal properties of the limited water dough system.

Key Words: debranching enzyme, heat moisture treatment, rice cookies, texture quality, thermal properties

* Corresponding author; e-mail address: Prisana.s@ku.ac.th

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

INTRODUCTION

Cookies are widely consumed in the world with their eating convenience and long shelf life. The major ingredients in cookies include flour, sugar, and fat. In particular the elucidation of the roles of sugar, flour constituents and fat as they influence cookie quality will be important to the development of future baking models. Rice is one of the important crops served as a staple food worldwide. Properties of rice starch could be improved by methods such as heat-moisture treatment (HMT), annealing, acid treatment, enzymatic hydrolysis or chemical modification. Hydrolyzed starches produced by hydrolysing starch with acid and/or enzyme are debranching linkages in starch and produces a sample with linear, low-molecular-weight and recrystallization polymer chains. The formation of crystalline structure is probably caused by the formation of inclusion complexes between amylose and small molecules. By HMT, starch is heated to temperature above its gelatinisation temperature, but with insufficient moisture to gelatinise. HMT promotes an increase in the gelatinisation transition temperature, a widening of the gelatinisation temperature range, a decrease in granular swelling and amylose leaching, and an increase in thermal stability (Chung *et al*., 2012).

Therefore, treated rice flour with enzyme treatment and heat moisture treatment was expected to be improved in limited water condition such as in cookies. Textural quality such as crispness, hardness and thermal properties are expected to be promoted by this modification.

MATERIALS AND METHODS

1. Preparation of modified rice flour

KDML-105 variety rice flour prepared following Suwannaporn *et al*. (2013). Polished rice grains were steeped in water for 3 h. Soaked rice grain were wet-milled using a locally made double-disk stone mill. The rice cake was dried in a tray dryer at 40 ˚C until the moisture content reached 10-12% (Native rice flour). A slurry of rice (10% w/v, dry basis) was hydrolysed using a debranching enzyme. 40 ASPU/g pullulanase was added into the suspension and allowed to further hydrolysis at 55 ˚C, for 6 h (Hydrolyzed rice flour). Heat-moisture treatment was prepared following Puncha-arnon and Uttapap (2013) with slight modifications. Moisture content of rice flour samples were adjusted to 25 % and heated at 100 ˚C for 1 h in close container (HMT rice flour). For the hydrolyzed-HMT rice flour, rice flour was treated with enzyme hydrolysis followed by HMT.

2. Preparation of rice cookies

Rice cookies were prepared following the AACC method 10-50D (AACC, 2000) with slight modifications. Butter, sugar, salt and baking powders (13, 19.2, 0.3 and 0.2% respectively) were mixed by blender (Mixer Eckert Model EK-20, Eckert, United States) for 3 min at speed level 2. Egg (18%) was added and mixed for 2 min, and then the rice flours (49.3%) was added and mixed for 2 min. The dough was sheeted to a thickness of 4 mm with a rolling pin, and cut with a circular cookie

cutter (inside diameter, 6 mm), which was then immediately baked for 13 min at 180 ˚C in an electric oven. Baked cookies were cooled to room temperature for 30 min and stored in a sealed plastic bag.

3. Spread ratio, diameter and thickness

The physical properties measured for cookies were diameter, thickness and spread ratio. In order to measure the diameter of the cookies, the following procedure reported by Noor Aziah *et al*. (2012) was adopted. Ten samples selected randomly were put next to one another and the total diameter was measured with a digital vernier caliper. Then all cookies were rotated by 90° and the new diameter was measured. The average of the two measurements divided by ten was taken as the final diameter of the cookie. Thickness was measured by stacking four cookies one above the other and restacking ten times using digital vernier caliper. The spread ratio was calculated using the formula: diameter of cookies divided by height of cookies.

4. Texture profile analysis

The texture properties of the cookies were measured through a compression test using an Instron Texture Analyzer (model 5564, Illinois Tool Works Inc., USA) equipped with a cylinder probe of 3 mm diameter and a load cell of 500 N. Testing was conducted at a test speed of 1 mm/s and a distance of 4 mm. The hardness and crispness of cookies was recorded and the average of ten replicates was reported. The peak mean from 3-point break test was defined as crispness.

5. Differential scanning calorimetry analyses (DSC)

Degree of gelatinisation was analyzed using a DSC (Star® System; Mettler-Toledo (Schweiz) GmbH, Im Langacher, 8606 Greifensee, Switzerland) equipped with a calorimetric analysis data station. For a gelatinisation study 12.5 mg (dry weight) of rice cookies was loaded into a stanless pan (Mettler, ME-27331), and deionised water was added to achieve a 80% sample – water suspension. Sample pans were hermetically sealed and allowed to stand for more than 24 h at room temperature before heating in the DSC. The temperature was increased at a rate of 5 ˚C min^{-1} from 25 ˚C to 125 ˚C. An empty pan was used as a reference. The measurements were performed in two replications and were repeated three times per replicate. From the DSC thermal profile, the onset temperature (T_o), peak temperature (T_p), conclusion temperature (T_c) and gelatinisation enthalpy (ΔH) were obtained.

RESULTS AND DISCUSSIONS

1. Physical properties and textural quality

Table 1 Instrumental measurements of native rice cookie and modified rice cookies.

	Samples*			
	Native	Hydrolyzed	HMT	Hydrolyzed-HMT
Spread ratio	5.76a ± 0.11	6.61c ± 0.16	6.00b ± 0.06	6.01b ± 0.09
Thickness (mm)	7.09c ± 0.06	5.92a ± 0.06	6.68b ± 0.09	6.63b ± 0.14
Diameter (mm)	40.20b ± 0.28	38.02a ± 0.15	39.59b ± 0.47	39.69b ± 0.16
Hardness (KgF)	1.28b ± 0.12	1.77c ± 0.07	1.01a ± 0.17	1.87d ± 0.23
Crispness (KgF)	1.17b ± 0.10	0.92a ± 0.16	1.08ab ± 0.13	1.57c ± 0.17

*Native: Native rice cookie; Hydrolyzed: Hydrolyzed rice cookie; HMT: Heat-moisture treated rice cookie; Hydrolyzed-HMT: Hydrolyzed + HMT rice cookie.

Values followed by the same letter in the same row are not significantly different ($p<0.05$).

The spread ratio of the modified rice cookie was increased while its thickness was decreased, compared with native rice cookie (Table 1). Similar result was found in cookies containing rice flour (Kim *et al*., 2002) and potato flour (Singh *et al*., 2003). Enzyme hydrolysis produced short chain dextrin which exhibited greater water retentions, resulting in more cookies spread during baking. As discussed earlier, enzyme hydrolysis and HMT occurred for the macromolecules such as starch in flours to the small molecules. Hoojjat and Zabik (1984) reported that the cookie spread ratio increased by increasing the amount of hydrophilic molecules in cookie dough. It was because those hydrophilic small molecules had the capacity for competing for free water in cookie dough. In general, the free water which is limited in cookie dough plays a critical role in determining the spread rate. When more free water exists, the internal dough viscosity becomes lower and thus the thickness was decreased and the spread ratio of the baked cookies increased. HMT induced the molecular rearrangement possibly among the macromolecules. The rearrangement induced by the thermal treatment was expected to change the overall matrix structure and water retention of the cookies.

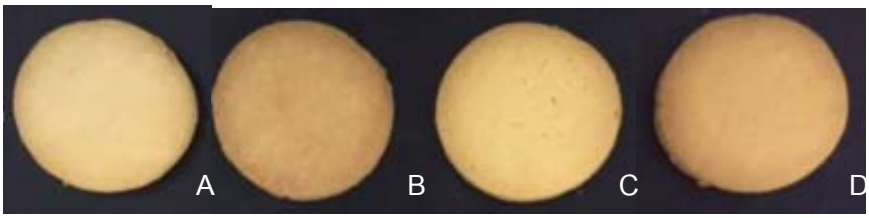


Fig. 1 Cookies made of native and modified rice flours. A: Native rice flour; B: Hydrolyzed rice flour; C: HMT rice flour; D: Hydrolyzed-HMT rice flour.

The textural property had major influences on the eating quality of cookies. Hardness is measured as the peak force of the cookies. HMT rice cookies required less force to snap than did the other samples. Whereas hardness of hydrolyzed and hydrolyzed-HMT rice cookies was higher than that of native. Chung *et al*. (2012) reported that the hardness increased after substituting the modified rice flour. As the HMT accelerated the molecular rearrangement between starch molecules, such as amylose-amylose and amylose-amylopectin, the interactions between starch chains become stronger than native. The crispness of HMT and hydrolyzed-HMT rice cookie was higher than that hydrolyzed rice cookie. It was because that enzyme hydrolysis produced short chain molecules which less rigid to form network. Heat and leavening agents have influences on the formation of gas bubble during cookie baking. The amount of force required to break the rice cookies increased significantly. Increasing values from the 3-point break test have been related to the development of crispness in cookies during baking: an important attribute resulting from the formation of a spongy structure in the initial stages of baking and a subsequent decrease in moisture content.

2. Differential scanning calorimetry

Table 2 Thermal properties of modified rice flour batter.

	Samples*			
	Native	Hydrolyzed	HMT	Hydrolyzed-HMT
T_o (˚C)	70.33a ± 0.72	70.34a ± 1.04	69.82a ± 1.17	72.12b ± 0.85
T_p (˚C)	74.05a ± 1.43	73.96a ± 1.20	77.19c ± 1.07	76.41b ± 0.91
T_c (˚C)	77.69a ± 0.92	78.90ab ± 1.44	82.43c ± 0.56	87.92d ± 1.07
T_c-T_o (˚C)	7.36a ± 0.00	8.56b ± 0.00	12.61c ± 0.00	15.80d ± 0.00
ΔH (J/g)	2.15a ± 0.16	4.60c ± 0.22	3.52b ± 0.27	6.16d ± 0.37

*Native: Native rice cookie; Hydrolyzed: Hydrolyzed rice cookie; HMT: Heat-moisture treated rice cookie; Hydrolyzed-HMT: Hydrolyzed + HMT rice cookie.

Values followed by the same letter in the same row are not significantly different ($p<0.05$).

The gelatinization transition temperature (To, Tp, Tc) and the enthalpy of gelatinization (ΔH) of native rice cookie and modified rice cookies are presented in Table 2. After the modification, To, Tp, Tc of modified rice cookies were shifted to a higher temperature with a broader temperature range (T_c-T_o) and enthalpy of modified rice cookies increased. This indicated the effect of enzyme treatment and HMT can improve thermal stability of rice cookies. It was influenced by the molecular architecture of the crystalline region, which corresponds to the distribution of short chain molecules. Exterior linear chains of amylopectin, degraded by enzyme hydrolysis and HMT, became just like amylose chains. Li *et al*. (2011) attributed the increase of the apparent amylose content to the interaction between starch chains within the amorphous area of the granule. In addition, rearrangement of amylose and

amylopectin inside starch granules, interactions of amylose and amylopectin in flours during enzyme hydrolysis, HMT and baking process would also strengthen the structure of starch. The modifications have been found to cause a change in the packing arrangement of the polymer chains and also causes partial crystal melting in hydrothermally treated starches. Hydrothermal treatment has been established to enhance perfection of crystallites. It is therefore reasonable, that following modifications, starch granules required more heat and time before structural disintegration (Lawal, 2005).

Differences in T_c-T_o due to the presence of crystallites, which are composed of small crystallites, each possessing slightly different crystal strength. Therefore, debranched starch with short amylopectin chains will produce several different types of crystallites and there was an increase in variation in crystallinity and perfect crystallites. According to Cooke and Gidley (1992), **Δ**H reflects the loss of double helical order rather than the loss of crystallinity. However, postulated that **Δ**H reflected the overall crystallinity (quality and amount of crystallites) of amylopectin. Shih *et al*. (2007) reported an increase in T_o and T_p in HMT rice starches at 40% moisture addition. These authors attributed the increase in T_o and T_p to the reduction in the destabilizing effect of amorphous regions on crystalline regions after HMT. The increase in T_o, T_p and T_c have been attributed to the formation of stable configuration due to the realignment of polymer chains with the noncrystalline regions of the granules. Hoover and Vasanthan (1994) attributed to increasing in T_o, T_p and T_c of HMT starches to structural changes in starch granules that arise mainly from amylose–amylose and amylose–lipid interactions. The increase in gelatinization temperatures can be associated to decrease in swelling power of starches following heat–moisture treatment.

The increases in gelatinize transition temperature and enthalpy indicated that the crystalline and rigid structure were increased due to the modifications. The crystalline and rigid structure may contribute to the increase in hardness of modified rice cookies. Therefore, the use of modified rice flours may affect the texture and thermal properties of the rice cookies.

CONCLUSIONS

All cookies made from modified rice flours had a higher spread ratio and less thickness than native flour. However, HMT could help lower its spread ratio comparable to only enzyme treatment. The hardness of rice cookies made from hydrolyzed and hydrolyzed-HMT rice flour was higher than native while the hardness of HMT rice cookie had less than native. The crispness of HMT rice cookie no difference from native. Hydrolysis modification and heat-moisture treatment could improve the thermal properties of rice cookie. The overall results showed that hydrolyzed-HMT rice flour could improve both textural qualities and thermal properties of the limited water dough system.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from The International Affairs Division and National Pingtung University of Science and Technology, Taiwan were gratefully acknowledged.

REFERENCES

AACC International. (2000). **Approved methods of the American Association of Cereal Chemists International**. Method 10-50D. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemist Inc.

Chung, H. J., A. R. Cho, and S. C. Lim. 2012. Effect of heat-moisture treatment for utilization of germinated brown rice in wheat noodle. **LWT-Food Science and Technology**. 47: 342-347.

Cooke, D., and M.J. Gidley. 1992. Lost of crystalline and molecular order during starch gelatinization : Origin of the enthalpic transition. **Carbohydrate research**. 227: 103-112.

Hoojjat, P., and M.E. Zabik. 1984. Sugar-snap cookies prepared with wheat navy bean sesame seed flour blends. **Cereal Chemistry**. 61: 41-44.

Hoover, R. and T. Vasanthan. 1994. The flow properties of native, heat-moisture treated, and annealed starch from wheat, oat, potato and lentil. **J. Food Biochem**. 18: 67-82.

Kim, H. Y. L., I. S.Lee, J.Y. Kang, and G. Y. Kim. 2002. Quality characteristics of cookies with various levels of functional rice flour. **Korean Journal of Food Science and Technology**. 34: 642-646.

Lawal, O. 2005. Studies on the hydrothermal modification of new cocoyam (Xanthosona sagittifolium) starch. Int. J. Biol. **Macromolecules**. 37: 268-277.

Noor Aziah, A. A., A. Y. Mohamad Noor, and L. H. Ho. 2012. Physicochemical and organoleptic properties of cookies incorporated with legume flour. **International Food Research Journal**. 19(4): 1539-1543.

Puncha-arnon, S., and D. Uttapap. 2013. Rice starch vs. rice flour: differences in their properties when modified by heat–moisture treatment. **Carbohydrate Polymers**. 91: 85– 91.

Shih, F., J. King, A. J. Dailek, and R. Ali. 2007. Physicochemical properties of rice starch modified by hydrothermal treatments. **Cereal Chemistry**. 119: 95-100.

Singh, J., N. Singh, T. R. Sharma, and S. K. Saxena. 2003. Physicochemical, rheological and cookie making properties of corn and potato flours. **Food Chemistry**. 83: 387–393.

Suwannaporn, P., K. Wiwattanawanich, and R. F. Tester. 2013. Effect of water requirement and alkali on wheat–rice noodle quality. **Starch/Stärke**. 65: 1–9.

การคัดเลือกสายพันธุ์ยีสต์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการผลิตเบียร์ข้าว

Selection of Potential Yeast Strains for Brewing Rice Beer

ณัฐกานต์ กีสด[1] อัมพิรา อินน้อย[1] และ อุลัยวรรณ์ วิทยเกียรติ[1*]

Nattakan Keesod[1], Ampira Innoi[1] and Ulaiwan Withayagiat[1*]

บทคัดย่อ

ยีสต์มีผลต่อรสชาติและกลิ่นหอมของเบียร์ ดังนั้นการเลือกยีสต์เป็นสิ่งสำคัญสำหรับกระบวนการหมักเพื่อให้มั่นใจต่อประสิทธิภาพของกระบวนการหมัก วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือการเลือกยีสต์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการผลิตเบียร์ที่ใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบหลัก (80% ข้าว : 20% มอลต์) ยีสต์ 11 ไอโซเลท ถูกแยกจากผลไม้ (BNS01, BNS03, BNS04, MG01, MG02 และ SC02) ลูกแป้ง (LPST02) สาโทพื้นบ้าน (LPST01) กากมอลต์ (SPG01) และชานอ้อย (BG01 และ BG02) พบยีสต์ 6 สายพันธุ์มีความสามารถในการหมักสูงเมื่อทดสอบด้วยอาหารเหลว Yeast Malt (YM) ยีสต์เหล่านี้ถูกทดสอบความสามารถในการหมักน้ำเวิร์ทที่อุณหภูมิ 4 และ 20 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า LPST01 มีการเติบโตอย่างรวดเร็ว สามารถใช้น้ำตาลรีดิวซ์ที่อุณหภูมิการหมัก 4 และ 20 องศาเซลเซียส คือ 75.798 และ 130.882 มก./มล. ตามลำดับ และใช้กรดอะมิโนไนโตรเจน (FAN) ที่อุณหภูมิการหมัก 4 และ 20 องศาเซลเซียส ปริมาณ 132.859 และ145.401 มก./มล. ตามลำดับ จึงส่งผลให้ยีสต์ LPST01 ผลิตเอทานอลได้สูงสุดทั้งในอุณหภูมิ 4 และ 20 องศาเซลเซียส คือ 17.148 และ42.599 กรัม/ลิตร ดังนั้น LPS01 จึงเป็นยีสต์ที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเบียร์ข้าวและเทียบได้กับยีสต์ทางการค้า

ABSTRACT

The brewer's yeast affects taste and aroma of the beer. Therefore, yeast selection was concerned carefully depend on fermentation process in order to ensure the good fermentation performance. The objective of this study was selection of isolated yeast for brewing rice beer (80% rice grits : 20% malt). The eleven yeasts were isolated from fruits (BNS01, BNS03, BNS04, MG01, MG02 and SC02) LookPang (LPST02), Sato (LPST01), malt meal (SPG01) and bagasse (BG01 and BG02). Six yeast isolates was shown strongly fermentable ability tested in Yeast Malt broth (YM). Those yeasts were tested the ability to ferment the wort at 4 and 20 ºC. The results indicated that, LPST01 yeast isolate was grown rapidly, reducing sugar consumption at 4 and 20 ºC were 75.798 and 130.882 mg/mL, respectively. Free alpha-amino nitrogen (FAN) utilization in beer fermentation at 4 and 20 ºC were 132.859 and 145.401 mg/mL, respectively. As a result, LPST01 was shown the highest ethanol production at 4 and 20 ºC as 17.148 and 42.599 g/L, respectively. Therefore, it could be used as potential brewing yeast for rice beer production and comparable to the commercial yeasts.

Key Words: brewer's yeast, rice beer, fermentability

Corresponding author; e-mail address: **fagiulw@ku.ac.th**

[1] ภาคเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ 10900

[1] Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

เบียร์เป็นเครื่องดื่มชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยม และมีแพร่หลายทั่วโลก ซึ่งองค์ประกอบหลักในการหมักเบียร์คือ น้ำ มอลต์ ฮอปส์ และ ยีสต์ นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมอื่นๆ เรียกว่าแอดจังท์ (Adjunct) หรือ ส่วนผสมข้างเคียง เช่น ผลเซอร์รี่ ราสเบอร์รี่ และเมล็ดธัญพืชอื่นๆ เช่น เมล็ดข้าวสาลี (Michael *et al*., 2012) ข้าวบาร์เลย์เป็นข้าวที่นิยมใช้ในการทำมอลต์มากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณเอนไซม์อะไมเลสสูง ซึ่งทำให้กระบวนการแตกตัวของแป้งเป็นน้ำตาลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่บาร์เลย์ที่ใช้ในปัจจุบันต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยในแต่ละปีมีมูลค่าการนำเข้าข้าวบาร์เลย์สูงมากส่งผลให้การผลิตเบียร์มีต้นทุนที่สูงขึ้น จึงได้มีการคิดหาวิธีการลดต้นทุนการผลิตโดยใช้วัตถุดิบทดแทนข้าวบาร์เลย์ ซึ่งได้เลือกใช้วัตถุดิบที่ผลิตได้มากในประเทศ เช่น ข้าวหอมมะลิ

ประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่สำคัญของการผลิตข้าว พันธุ์ข้าวที่นิยมปลูกกันมากได้แก่ ข้าวหอมมะลิ หรือข้าวหอมมะลิ 105 เนื่องจากมีกลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์ที่โดดเด่น ข้าวหอมมะลิมีปริมาณการผลิตสูงถึง 1.06 - 1.45 ตัน/ปี ซึ่งคิดเป็นสัดส่วน 20-27% ของการส่งออกข้าวรวมของไทย ในบางประเทศเช่น จีน ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา ได้มีการใช้ข้าวเป็นวัสดุเสริมที่สำคัญของการผลิตเบียร์ (Narziss, 1984) การศึกษาก่อนหน้านี้มีการใช้ข้าวหอมมะลิแทนการใช้ข้าวบาร์เลย์ในการผลิตเบียร์ในอัตราส่วนสูงถึง 80% (Pliansrithong, 2014) อย่างไรก็ตามสารองค์ประกอบของข้าวและข้าวบาร์เลย์ก็มีความแตกต่างกันเช่นปริมาณโปรตีน และคาร์โบไฮเดรตที่มีผลต่อกิจกรรมการหมักของยีสต์ และคุณภาพการหมักเบียร์ (Van, 2001) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการคัดเลือกยีสต์ที่เหมาะสมสำหรับการหมักเบียร์ที่ใช้ข้าวหอมมะลิแทนการใช้ข้าวบาร์เลย์ในอัตราส่วน 80:20

จึงมีการตั้งสมมติฐานว่า การหมักเบียร์โดยใช้ข้าวหอมมะลิสูงถึง 80% ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาล ชนิดของน้ำตาล ปริมาณกรดอะมิโนในน้ำเวิร์ทเปลี่ยนไปจากการหมักเบียร์ข้าวบาร์เลย์ 100% จึงมีความจำเป็นต้องคัดเลือกสายพันธุ์ยีสต์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเบียร์ข้าว

อุปกรณ์และวิธีการ

Yeast isolation

นำตัวอย่างบด 5 กรัม ใส่ในอาหารเหลว YM broth 50 มิลลิลิตร บ่มบนเครื่องเขย่าความเร็ว 160 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48-72 ชั่วโมง จากนั้นนำอาหารเหลวที่ได้มา Streak บนอาหาร YM agar บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48-72 ชั่วโมง คัดเลือกโคโลนีเดี่ยวที่มีลักษณะต่างกันมาทำการขีดลงบนอาหาร YM agar บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48-72 ชั่วโมง จนได้เชื้อยีสต์บริสุทธิ์ เก็บรักษาเชื้อยีสต์บริสุทธิ์ในอาหาร YM agar slant บ่มที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48-72 ชั่วโมง และนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพการหมัก

การคัดเลือกเชื้อยีสต์ที่สามารถเกิดกิจกรรมการหมักได้โดยสังเกตจากการสร้างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

นำเชื้อยีสต์ 1 loop ใส่ลงในหลอดทดลองที่มีอาหาร YM broth ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และมีหลอดดักแก๊สบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สังเกตหลอดที่เกิดแก๊ส และทดสอบแก๊สที่เกิดขึ้นเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)โดยการเติมน้ำยา 10% โปรแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดที่เกิดแก๊ส เขย่าเบาๆ เพื่อให้แก๊สในหลอดดักแก๊สทำปฏิกิริยากับ 10% KOH สังเกตระดับช่องว่างในหลอดดักแก๊สลดลงแสดงว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับสาร KOH ดังนั้นแก๊สที่ยีสต์สร้างจึงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ คัดเลือกยีสต์ที่สามารถผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไปทดสอบการหมักโดยใช้เวิร์ทข้าว 80%

การคัดเลือกยีสต์ที่สามารถหมักเบียร์ข้าว 80%

การเตรียมน้ำเวิร์ทจากข้าวบาร์เลย์ 20% ผสมกับ ข้าวหอมมะลิ 80%

ผสมมอลต์จากข้าวหอมมะลิกับน้ำในอัตราส่วน 1 : 5 ใส่เอนไซม์ Neutase 400 ไมโครลิตรต่อข้าว 50 กรัม ต้มที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นใส่เอนไซม์ Termamyl 400 ไมโครลิตรต่อข้าว 50 กรัม เพิ่มอุณหภูมิเป็น 90 องศาเซลเซียส 20 นาที ลดอุณหภูมิเหลือ 62 องศาเซลเซียส ปรับ pH 5.2 ใส่มอลต์จากบาร์เลย์อัตราส่วน 20 % ต่อข้าว 80% ต้ม 62 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที 70 องศาเซลเซียส 30 นาที และ 85 องศาเซลเซียส 5 นาที เพื่อหยุดกิจกรรมของเอนไซม์แล้วจึงทำการกรองเพื่อกำจัดตะกอนออกไป จากนั้นใส่ฮ็อพ (Hallertau Herkules) เพื่อให้ได้ความขมเท่ากับ 25 BU แล้วต้มเดือดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ลดอุณหภูมิให้เย็นลงเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

การเตรียมกล้าเชื้อ

เขี่ยโคโลนีเซลล์เดี่ยวของยีสต์ลงในน้ำเวิร์ทปริมาตร 10 มิลลิลิตรในหลอดทดลอง และนำไปเขย่า 200 รอบ/นาที ที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงเติมในน้ำเวิร์ทปริมาตร 200 มิลลิลิตร บ่มที่ 20 องศาเซลเซียส 140 รอบ/นาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นจึงเติมในน้ำเวิร์ทปริมาตร 1 ลิตร บ่มที่ 15 องศาเซลเซียส 140 รอบ/นาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เลี้ยงเซลล์ให้ได้ปริมาณที่ต้องการ คือ 10^6 เซลล์/มิลลิลิตร/บริกซ์ เมื่อเซลล์ครบจำนวนแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเซลล์และส่วนใสโดยใช้ความเร็วรอบ 4000 รอบ/นาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

การติดตามกิจกรรมของยีสต์ขณะดำเนินการหมักเบียร์ข้าว

นำยีสต์ที่คัดเลือกได้มาทำการหมักโดยใช้เวิร์ทข้าว 80% ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ทำการหมักที่อุณหภูมิ 4 และ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ จำนวน 3 ซ้ำ ทำการเก็บตัวอย่างทุกวันๆละ 1 ครั้ง ตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตรถูกนำมานับจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต วัด pH วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพื่อประเมินกิจกรรมการหมัก วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณกรดอะมิโนไนโตรเจน และปริมาณเอทานอลในผลิตภัณฑ์สุดท้าย จากนั้นวิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยจากค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิต (SPSS, version 14, USA)

การนับเซลล์

การนับเซลล์ที่มีชีวิตในน้ำเวิร์ทในระหว่างการหมักโดยใช้ Haemocytometer และ Methelene blue ความเข้มข้น 0.1% โดยนับเซลล์ที่มีชีวิตซึ่งจะไม่ติดสีของ Methelene blue

วัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (ºBrix) โดยใช้ Reflectometer

วัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (ºBrix) เริ่มต้นของน้ำเวิร์ทเพื่อทำการปรับบริกซ์เริ่มต้นสำหรับการหมักให้เท่ากับ 12 บริกซ์ เพื่อกำหนดระดับแอลกอฮอล์ในเบียร์ให้อยู่ในช่วง 3-5% (V/V)

การวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโนไนโตรเจน (FAN) ด้วยวิธีนินไฮดริน EBC 8.10 (1998)

ตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำ 100 มิลลิลิตร จากนั้นใส่สารเจือจางที่ได้ 2 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองแล้วใส่สารสี 1 มิลลิลิตร (Na_2HPO_4 100 กรัม, KH_2PO_4 60 กรัม , ninhydrin 5 กรัม และ fructose 3 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร) นำไปต้มให้เดือด 16 นาที แล้วจึงหยุดปฏิกิริยาด้วยน้ำเย็น จากนั้นใส่ 5 มิลลิลิตร ของสารละลายผสม (KIO_3 2 กรัม ในน้ำกลั่น 600 มิลลิลิตร กับ 400มิลลิลิตร ของเอทานอล 96 %) แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 570 นาโนเมตร ส่วน Blank เตรียมเหมือนตัวอย่างแต่ใช้น้ำกลั่นแทน

$$\text{FAN}\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = \frac{\text{A1}\times 2\times \text{d}}{\text{A2}}$$

โดยที่ ; A1 = ค่าการดูดกลืนแสงที่ 570 นาโนเมตร

A2 = ค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานที่ 570 นาโนเมตร

d = ค่าการเจือจาง

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง ด้วยวิธี Dinitrosalicylic Acid (DNS method, Miller, 1959)

วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่งในตัวอย่างโดยการเติมสารละลายตัวอย่างปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร น้ำกลั่น ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร และสารละลาย DNS ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง ต้มในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาทีและทำให้เย็นลงจากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร แล้วเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่งในตัวอย่างกับกราฟมาตรฐานของปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่งมอลโทสที่มีความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.9 กรัม / ลิตร โดยให้ค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 0.1- 0.8

การวิเคราะห์ปริมาณเอทานอล (Sumbhate *et al*., 2012)

ปิเปตต์สารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 4 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง เติมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 1 นอร์มัล ลงไป 25 มิลลิลิตร เติมแอซิเตตบัฟเฟอร์ (CH_3COOH) pH 4.3 ลงไป 5 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไดโครเมต ($Na_2Cr_2O_7$ 20 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร) ลงไป 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน บ่มในที่มืดอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 578 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาความเข้มข้นของเอทานอลจากกราฟมาตรฐานของปริมาณเอทานอลในสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1, 1.0, 3.0, 5.0 และ 10.0 กรัม ลิตร

$$\text{ปริมาณเอทานอล (กรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสง} \times \text{อัตราการเจือจาง}}{\text{ความชันของกราฟมาตรฐาน}}$$

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การคัดแยกยีสต์

ทำการแยกยีสต์จาก ผิวเปลือกกล้วยหอม, ผิวเปลือกกล้วยน้ำว้า, ผิวเปลือกกล้วยไข่, ลูกแป้งสาโทหมายเลข 1, ลูกแป้งสาโทหมายเลข 2, มะม่วงดอง, ชานอ้อย, โมลาส, มะม่วงน้ำดอกไม้, กากมอลต์จากอุตสาหกรรมเบียร์ สามารถคัดแยกยีสต์ได้ทั้งหมด 11 ไอโซเลท ดังแสดงใน Table 1 เมื่อนำมาเลี้ยงใส่อาหารเหลว YMปริมาตร 5 มิลลิตร พบว่ายีสต์ BG01, BNS02 และ SPG01 มีลักษณะเป็นออกซิเดทีฟยีสต์ (oxidative yeast) ยีสต์พวกนี้เติบโตเฉพาะผิวหน้าของอาหาร ทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มขึ้น จึงมักเรียกยีสต์กลุ่มนี้ว่า ฟิล์มยีสต์ (film yeast) ซึ่งไม่นิยมที่จะนำฟิล์มยีสต์มาหมักเบียร์ ในขณะที่พบยีสต์ BG02 และ LPST01 มีเซลล์ตกตะกอนที่ก้นหลอด ซึ่งเป็นลักษณะของยีสต์ที่มีความหนาแน่นเซลล์สูงซึ่งสะดวกต่อการแยกเซลล์เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก

การทดสอบความสามารถการเกิดกิจกรรมการหมักได้โดยสังเกตจากการสร้างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

นำยีสต์ที่คัดแยกได้จากข้อ 1 เป็นจำนวน 8 ไอโซเลท ได้แก่ SC02, LPST01, LPST02, MG01, MG02, BNS01, BNS03 และ BNS04 หมักในอาหารเหลว YM ที่มีหลอดดักแก๊สเพื่อทดสอบความสามารถการเกิดกิจกรรมการหมักของยีสต์ สามารถสังเกตจากการสร้างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของยีสต์ที่คัดแยกได้ พบว่ายีสต์ SC02 และ LPST02 ไม่สามารถสร้างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จากสมการการหมักของยีสต์

$$C_6H_{12}O_6 \text{ ----------> } 2C_2H_5OH + 2CO_2 + \text{energy}$$

หากยีสต์สามารถใช้น้ำตาลในอาหาร YM ได้จะสร้างคาร์บอนไดออกไซด์ และเอทานอล ดังนั้นหากนำยีสต์SC02 และ LPST02 ไปหมักเบียร์ยีสต์ทั้งสองจะไม่สามารถเปลี่ยนน้ำตาลในน้ำเวิร์ทเป็นเอทานอลได้

Table 1 Colony morphology of isolated yeasts

Source	CODE of yeast isolates	The growth in YM broth	Colonies Morphology		
			Form	Margin	Color
Sato	LPST01	Sediment	Circular	Entire	White
LookPang	LPST02	Diffuse	Circular	Undulate	White
Cavendish banana peel	BNS01	Diffuse	Circular	Entire	White
Malt meal from industry	SPG01	surface	Circular	Entire	White
Golden banana peel	BNS02	surface	Circular	Undulate	White
	BNS03	Diffuse	Circular	Entire	White
Pisang Awak banana peel	BNS04	Diffuse	Circular	Entire	White
Bagasse	BG01	surface	Circular	Undulate	White
	BG02	Sediment	Circular	Entire	White
Nam Dok Mai mango	MG01	Diffuse	Circular	Entire	White
	MG02	Diffuse	Circular	Entire	White
Molasses	nd				
Pickled mango	nd				

nd = not detected

การทดสอบความสามารถในการหมักเบียร์ข้าว

นำยีสต์ที่คัดเลือกได้จำนวน 6 ไอโซเลทได้แก่ LPST01, MG01, MG02,BNS01, BNS03 และ BNS04 มาทำการหมักในน้ำเวิร์ทที่มีข้าวเป็นส่วนผสมหลัก 80 % โดยทำการหมักที่ 2 อุณหภูมิ คือ 4 และ 20 องศาเซลเซียส ติดตามกิจกรรมการหมักของยีสต์ทุกวันเป็นเวลา 2 สัปดาห์ น้ำเวิร์ทเริ่มต้น pH 5.3 กำหนดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 12 บริกซ์ (ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 165.083 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาณ FAN 159.000 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่ายีสต์ทุกไอโซเลทสามารถดำเนินการหมักได้ผลดังนี้

ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ในการหมักเบียร์ข้าวที่อุณหภูมิ 4 และ 20 องศาเซลเซียสกำหนด pH เริ่มต้นเท่ากับ 5.3 จากผลการทดลองพบว่าการหมักที่อุณหภูมิ 4 และ 20 องศาเซลเซียสยีสต์จะสร้างกรดในขณะหมักทำให้ pH ของเบียร์ข้าวลดต่ำลงโดยการหมักที่ 4 องศาเซลเซียสจะมี pH ลดลงเหลือ 3.7 ส่วนการหมักที่ 20 องศาเซลเซียสจะมี pH ลดลงมากกว่า คือ pH สุดท้ายอยู่ที่ระดับ 3.3 ซึ่งการหมักที่อุณหภูมิสูงยีสต์จะเพิ่มจำนวนเซลล์ได้มากกว่าจึงสร้างกรดมากกว่าการหมักที่อุณหภูมิต่ำ และพบว่ายีสต์ LPST01 สร้างกรดได้สูงกว่ายีสต์ไอโซเลทอื่นที่คัดแยกได้ เนื่องมากจากปริมาณกรดแปรผันตรงกับจำนวนเซลล์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความเป็นกรดที่ยีสต์สร้างขึ้นจะช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนทำให้ยีสต์เจริญได้ดีขึ้น แต่ถ้าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 3.0 จะทำให้ประสิทธิภาพการหมักลดลง (Amerine *et al.,* 1980) อย่างไรก็ตามค่าพบว่า pH ของผลิตภัณฑ์เบียร์ข้าวมีค่าต่ำกว่าเบียร์มาตรฐานทั่วไป คือ 4.1-4.5 ซึ่งอาจทำให้เบียร์มีรสชาติเปรี้ยวคล้าย Lambic beer ที่มีค่า pH ที่ระดับ 3.0-3.4

ความเข้มข้นของเซลล์ที่มีชีวิตในระหว่างการหมัก

ในการหมักเบียร์ข้าวทั้ง 2 อุณหภูมิกำหนดเซลล์ยีสต์เริ่มต้นเท่ากับ 12 ล้านเซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่า การหมักเบียร์ข้าวที่ 4 องศาเซลเซียสยีสต์เจริญได้น้อยกว่าการหมักที่ 20 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวยีสต์มีการเพิ่มจำนวนเซลล์ได้เร็วกว่าและมีกิจกรรมการหมักที่สูงกว่า 4 องศาเซลเซียส (Figure1) นอกจากนั้นยัง

พบว่า LPST01 และ BNS04 เจริญได้ดีกว่ายีสต์ตัวอื่นที่คัดแยกได้เมื่อหมักที่ 20 องศาเซลเซียส แต่เมื่อหมักที่ 4 องศาเซลเซียส BNS04 เจริญได้น้อย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเหมาะสมต่อการเจริญของ BNS04มากกว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ จากการศึกษาของ Dunn and Sherlock (2008) พบว่าความสามารถในการทำงานของยีสต์ในสภาวะอุณหภูมิต่ำเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของบอตทอมยีสต์ (Bottom yeast) ซึ่งจะมีการเจริญเติบโตช้า สร้างสารให้กลิ่นน้อย รวมทั้งมีการสร้างแอลกอฮอล์หนัก (fusel alcohols) ที่อุณหภูมิต่ำ และลักษณะดังกล่าวเป็นคุณสมบัติของยีสต์ *Saccharomyces pastorianus* ในขณะที่ยีสต์ที่สามารถดำเนินการหมักที่อุณหภูมิสูงแต่ไม่หมักที่อุณหภูมิต่ำ (4 องศาเซลเซียส) เป็นคุณสมบัติของ *Saccharomyces cerevisiae* ที่นิยมใช้ในการหมักเบียร์แอล หรือเรียกว่า ทอปยีสต์ (Top yeast)

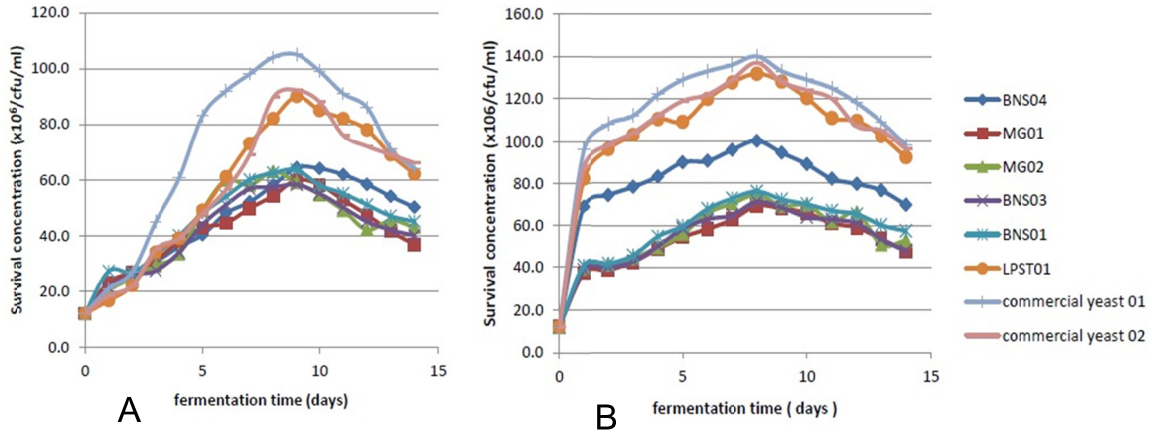


Figure1 Relative between survival cell concentration and fermentation time at 4ºC (a) and 20ºC (b)

ปริมาณการใช้น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) และกรดอะมิโนไนโตรเจน (FAN)

ในการหมักเบียร์ข้าวทั้ง 2 อุณหภูมิกำหนดค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่า 12 บริกซ์ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะการหมัก โดยที่ 4 องศาเซลเซียสมีค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 12 - 8.4 บริกซ์ ส่วนการหมักที่ 20 องศาเซลเซียสมีค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 12 - 5 บริกซ์ โดยในการหมักทั้ง 2 อุณหภูมิยีสต์ LPST01 สามารถเจริญและมีกิจกรรมการหมักที่ดีเมื่อเทียบกับยีสต์ตัวอื่นที่คัดแยกได้จึงมีการใช้น้ำตาลสูงที่สุด นอกจาก LPST01 แล้ว BNS04 เจริญและมีกิจกรรมการใช้น้ำตาลที่ดีที่การหมักที่ 20 องศาเซลเซียส (Table 2)

จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลด้วยค่าความแปรปรวนด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ (spss) พบว่า ทั้งที่การหมักอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และ 20 องศาเซลเซียส ยีสต์ทุกไอโซเลทและยีสต์ทางการค้ามีความสามารถในการใช้น้ำตาลแตกต่างกัน โดยยีสต์ commercial yeast 01 และ commercial yeast 02 มีปริมาณการใช้น้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่สูงสุด และในส่วนของยีสต์ที่คัดแยกพบว่า LPST01 อยู่ในกลุ่มที่ใช้น้ำตาลรีดิวซ์สูงรองจากยีสต์ทางการค้าและไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับยีสต์ commercial yeast 02 ที่อุณหภูมิการหมัก 4 องศาเซลเซียส

ที่การหมักอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และ 20 องศาเซลเซียส ยีสต์ทางการค้า commercial yeast 01 และ commercial yeast 02 มีปริมาณการใช้ FAN เฉลี่ยอยู่ในกลุ่มที่สูงสุด ในส่วนของยีสต์ที่คัดแยกได้พบว่า LPST01 ใช้ FAN สูงรองจากยีสต์ทางการค้า โดย FAN มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของยีสต์ และคุณภาพของโฟมในน้ำเบียร์ Young (1993) และ Meilgard (1976) กำหนดปริมาณ FAN ต่ำที่สุดที่ยีสต์ต้องการอยู่ที่ 100

มิลลิกรัม/ลิตร เนื่องจากยีสต์จะใช้พลังงาน และสารอาหารจากน้ำเวิร์ทเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต และยีสต์ต่างสายพันธุ์จะมีความจำเพาะต่อการใช้น้ำตาลและไนโตรเจนที่ต่างกัน ดังนั้นในการศึกษานี้จะแสดงให้เห็นว่ายีสต์ที่สามารถใช้ FAN และน้ำตาลรีดิวซ์ในปริมาณที่สูงจะมีอัตราการเจริญเติบโตในอัตราที่สูงขึ้นตามไปด้วย

Table 2 Reducing sugar and FAN (mg/ml) utilization in beer fermentation at 4ºC and 20ºC for 2 weeks

Yeasts	Reducing sugar (mg/ml)		FAN (mg/ml)	
	4 ºC	20 ºC	4 ºC	20 ºC
BNS04	52.927±0.68^{b}	116.009±0.77^{e}	86.989±1.00^{d}	116.124±0.50^{d}
MG01	51.723±0.55^{b}	58.975±0.66^{a}	80.860±0.80^{a}	92.644±0.56^{b}
MG02	46.231±0.66^{a}	72.055±0.62^{c}	82.188±0.58^{b}	87.761±4.16^{a}
BNS03	44.235±1.65^{a}	64.086±0.51^{b}	80.804±0.41^{a}	96.193±0.05^{c}
BNS01	42.232±1.28^{a}	75.939±0.09^{d}	84.411±0.58^{c}	98.463±2.45^{c}
LPST01	75.798±1.91^{c}	130.882±0.59^{f}	132.859±0.54^{e}	145.401±1.79^{e}
Commercial yeast 01	90.154±2.26^{d}	137.151±0.65^{h}	144.110±1.19^{g}	150.506±0.60^{f}
Commercial yeast 02	85.986±6.93^{c}	132.061±0.72^{g}	137.787±0.50^{f}	148.648±0.96^{f}

$^{a, b, c, d, e, g, h, f}$ Different superscript letter within column indicated values were significantly different at the level of $p \leq 0.05$.

ผลการวิเคราะห์ปริมาณเอทานอลสุดท้าย

จากการวิเคราะห์พบว่าเบียร์ข้าวที่หมักในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีปริมาณเอทานอลน้อยกว่าที่ 20 องศาเซลเซียส และยังพบว่าในการหมักทั้ง 2 อุณหภูมิ ยีสต์ LPST01 สามารถสร้างเอทานอลได้สูงกว่ายีสต์ที่คัดแยกได้ไอโซเลทอื่นคือ 17.148 กรัม/ลิตร ที่ 4 องศาเซลเซียส และ42.599 กรัม/ลิตร ที่ 20 องศาเซียสเซียส (Figure 2) ส่วน BNS04 สร้างเอทานอลได้น้อยเมื่อหมักที่ 4 องศาเซลเซียสแต่สามารถสร้างเอทานอลได้สูงเกือบเทียบเท่า LPST01 เมื่อหมักที่ 20 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ปริมาณของเอทานอลมีความสัมพันธ์กับอัตราการเจริญของยีสต์ ปริมาณการใช้น้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณการใช้ FAN โดยพบว่ายีสต์ที่สามารถผลิตเอทานอลได้ในปริมาณที่สูง จะมีอัตราการเจริญที่สูง มีปริมาณการใช้น้ำตาลรีดิวซ์ และ FAN ที่สูงตามไปด้วย

จากผลการศึกษากิจกรรมการหมักของยีสต์ที่คัดแยกได้เปรียบเทียบกับยีสต์ทางการค้า พบว่า LPTS01 และยีสต์ทางการค้าสามารถดำเนินการหมักในเวิร์ทที่ใช้ข้าวเป็นส่วนผสมหลักได้เป็นอย่างดี ซึ่งอาจเนื่องจาก LPTS01 เป็นยีสต์ที่คัดแยกได้จากสาโทซึ่งมีการใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบและยีสต์ทางการค้าที่ถูกเพาะเลี้ยงในเวิร์ทจากจากมอลต์บาร์เลย์ซึ่งจัดเป็นธัญพืชเช่นเดียวกัน ในขณะที่ยีสต์ไอโซเลท MG01, MG 02 BNS01, BNS 03 และ BNS04 เป็นยีสต์ที่คัดแยกได้จากผลไม้ที่มีชนิดของน้ำตาลและกรดอะมิโนต่างจากธัญพืชนั่นเองเมื่อนำมาหมักในเวิร์ทจากธัญพืชจึงไม่สามารถปรับกิจกรรมให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม BNS04 ที่คัดแยกได้จากกล้วยน้ำว้ามีศักยภาพในการหมักที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและสร้างกลิ่นหอมได้ชัดเจนเป็นหนึ่งไอโซเลทที่ควรนำไปศึกษาเพิ่มเติมและปรับปรุงคุณภาพในการหมักต่อไป

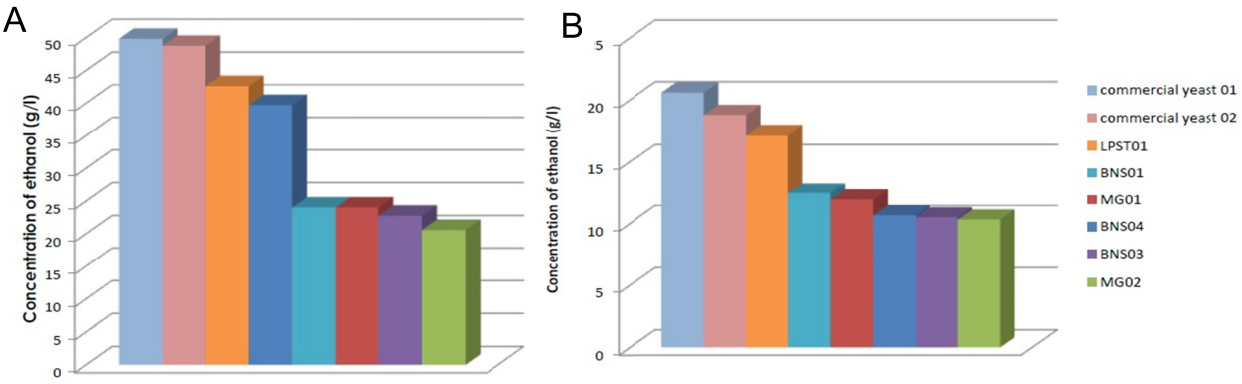


Figure 2 Relative between survival concentration and fermentation time at 4 ºC (a) and 20 ºC (b)

สรุป

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการคัดเลือกสายพันธุ์ยีสต์ที่มีศักยภาพต่อการผลิตเบียร์ที่ใช้ข้าวเป็นส่วนผสมหลัก โดยยีสต์จำนวน 6 ไอโซเลท มีความสามารถในการหมัก ได้แก่ BNS01 จากกล้วยไข่, BNS03 จากกล้วยหอมทอง , BNS04 จากกล้วยน้ำว้า ,MG01 และ MG02 จากมะม่วงน้ำดอกไม้ และ LPST01 จากสาโท ยีสต์ทั้งหมดที่คัดแยกได้จัดเป็นบอททอมยีสต์ คือ เมื่อสิ้นสุดการหมัก ยีสต์เหล่านี้จะตกตะกอนอยู่ที่ก้นภาชนะ โดยยีสต์ LPST01 มีความสามารถในการหมักเบียร์ข้าวสูงสุดทั้งที่อุณหภูมิ 4 และ 20 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพการหมักเกือบเทียบเท่ายีสต์ทางการค้า จึงเหมาะสมที่จะนำไปศึกษาคุณสมบัติเพิ่มเติมและพัฒนาสายพันธุ์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Bajomo, M. F. and W. T. Young. 1993. The properties, composition and fermentabilities of wort made from 100% raw sorghum and commercial enzymes. **Journal of the Institute of Brewing**. 99, 153-158.

Dunn, B. and G. Sherlock. 2008. Reconstruction of the genome origins and evolution of the hybrid lager yeast Saccharomyces pastorianus. **Genome Research Journal**. 18, 1610–1623.

Meilgaard, M. 1976. Wort composition : with special reference to the use of adjuncts. **Technical Quarterly of the Master Brewers Association of the American.**13, 78-90.

Narziss, L. 1984. The German Beer Law. **Journal of the Institute of Brewing**. 90, 351-358.

Lyu, L., P. W. Nam, S. J. Lee and K. G. Lee. 2013. Volatile compounds isolated from rice beers brewed with three medicnal plants. **Journal of the Institute of Brewing**. 119, 271-279.

Pliansrithong, P. 2014. **Increasing of free amino nitrogen in beer by using rice as brewing adjunct.** M.E. Thesis, Kasetsart University.

Stewart G. 2006. Studies on the uptake and metabolism of wort sugars during brewing fermentations. **Technical Quarterly of the Master Brewers Association of the American.** 43, 264-269.

Van, V. M. L., P. Strehaiano, D. C. Nguyen and P. Taillandier. 2001. Microbial protease or yeast extract alternative additions for improvement of fermentation performance and quality of beer with a high rice content. **The Journal of the American Society of Brewing Chemists**. 59(1),10-16.

การเพิ่มคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ด้วยเทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Improvement on Antioxidant Properties of Brown Rice (Riceberry Cultivar) with Ultra Superheated Steam Technology

ธนัญชนก คำไท้[1] และ วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ[1*]

Thananchanok Khamtai[1] and Wannasawat Ratphitagsanti[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของการใช้เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (USST) ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องพันธุ์ไรซ์เบอรี่ โดยศึกษาอุณหภูมิของ USST ที่ 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส จำนวนรอบในการผ่าน USST ที่ 5 และ 10 รอบ พบว่า USST ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ อุณหภูมิและจำนวนรอบในการผ่านกระบวนการ USST เพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวในด้านค่าความหนืดสูงสุด ค่าการแตกตัว และค่าความหนืดสุดท้ายมีค่าลดลง ขณะที่อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของข้าวกล้องพันธุ์ไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST มีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) อุณหภูมิของ USST ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และมีค่าสูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จำนวน 5 รอบ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST มีค่าสูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จำนวน 10 รอบ การใช้ USST กับข้าวกล้องไรซ์เบอรี่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้น โดยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าว

ABSTRACT

Ultra superheated steam technology (USST) was employed to treat brown rice (riceberry cultivar). The objective of this research was to investigate the influence of process condition on physical and antioxidant properties of riceberry grains. USST was used at 250, 300 and 350°C for 5 and 10 cycles. The color difference (ΔE^*) between untreated control and USST-treated riceberry was minimal. Changes of pasting properties were observed when increasing USST temperatures and numbers of cycles. Peak viscosity, breakdown and final viscosity were decreased. USST treatment at 350°C for 5 cycles yielded the highest antioxidant activity, whereas the highest total phenolic content was observed at 300°C for 10 cycles. Results from this study demonstrated that USST could improve antioxidant properties of riceberry without physical changes on grain appearance by visual examination.

Key Words: riceberry, *Oryza sativa* L., superheated steam, antioxidant, DPPH

* Corresponding author; e-mail address: **wannasawat.r@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ข้าวกล้องจัดเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวที่มีการขัดสี เนื่องจากมีส่วนของรำข้าวที่อุดมด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย อย่างไรก็ตามข้าวกล้องยังมีปัญหาเรื่องระยะเวลาในการหุงต้มที่นาน เนื่องจากการดูดซับน้ำช้าเป็นผลมาจากใยอาหารที่มีอยู่ในรำข้าว นอกจากนี้ไขมันที่อยู่ในรำข้าวทำให้อายุการเก็บของข้าวกล้องสั้นลง ทำให้เกิดกลิ่นหืนจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทั้งยังมีโอกาสเกิดการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์และแมลง ซึ่งเป็นข้อเสียในการใช้ประโยชน์จากข้าวกล้อง (Guevarra *et al*., 2015)

ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอรี่เป็นข้าวที่ได้จากการปรับปรุงพันธุ์ มีเมล็ดสีม่วงเข้มจนเกือบดำ ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประโยชน์ทางโภชนาการให้กับผู้บริโภค มีธาตุเหล็กสูง กลูโคสต่ำ และมีสารต้านอนุมูลอิสระสูง สารต้านอนุมูลอิสระที่พบในข้าวไรซ์เบอรี่ เช่น วิตามินอี พอลีฟีนอล และไฟโตสเตอรอล (Leardkamolkarn *et al*., 2011) การใช้ความร้อนเป็นกระบวนการพื้นฐานในการยืดอายุการเก็บผลิตภัณฑ์ ซึ่งความร้อนสามารถทำลายแมลงและจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน แต่ความร้อนมักส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและสารอาหารในผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกี่ยวข้องกับการใช้ไอน้ำที่มีความร้อนสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีความปลอดภัยและเหมาะสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม Wu *et al*. (2014) ใช้เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการยับยั้งปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดกลิ่นหืนของข้าวกล้อง ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาผลของกระบวนการใช้ความร้อนต่อฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น งานวิจัยของ Choi *et al*. (2006) ศึกษาผลของการใช้ความร้อนต่อกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอลิกของเห็ด และ Kim *et al*. (2011) ศึกษาผลของกระบวนการคั่ว (roast process) ต่อกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของถั่วเหลืองผิวดำเมล็ดเล็ก (small black soybean) สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณภาพทางกายภาพและสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องไรซ์-เบอรี่เมื่อผ่านการใช้เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เพื่อการพัฒนาคุณภาพของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่สำหรับการส่งออกและสำหรับการแปรรูปผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพที่ปลอดภัยจากแมลงและสารเคมี

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบและอุปกรณ์

ข้าวกล้องพันธุ์ไรซ์เบอรี่ (*Oryza sativa* L.) ผลิตโดย ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม บรรจุในถุงพลาสติกสุญญากาศเก็บที่อุณหภูมิห้อง

เครื่องผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Model SH-30CY, Denki Koyo, JSP Co., Ltd., Tokyo) โดยการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ (boiler) ผลิตไอน้ำเป็นไอน้ำอิ่มตัว เมื่อไอน้ำอิ่มตัวผ่านเทคโนโลยีความถี่สูงเหนี่ยวนำความร้อนจากวัสดุกำเนิดความร้อน (heat element) ทำให้ไอน้ำอิ่มตัวเปลี่ยนเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งอุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส (Figure 1)

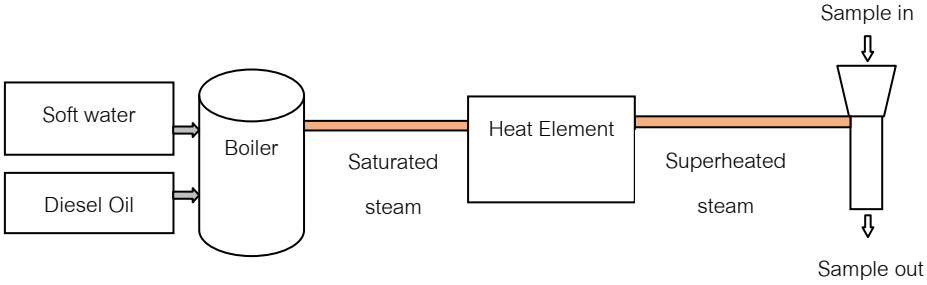


Figure 1 Equipment layout of USST system.

การใช้เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับข้าวกล้องพันธุ์ไรซ์เบอรี่

ศึกษาผลการใช้เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์และจัดสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial in CRD) ปัจจัยที่ศึกษา คือ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (USST) ที่อุณหภูมิ 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และจำนวนรอบที่ผ่านเครื่องไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (USST) ที่ 5 และ 10 รอบ เวลาในการสัมผัสความร้อนของเมล็ดข้าวภายใน sample drop type ประมาณ 3 วินาทีต่อ 1 รอบ ซึ่งการทดลองที่สภาวะดังกล่าว ไม่ส่งผลต่อลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าว และไม่เกิดการไหม้ของเมล็ดข้าว นำข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ 150 กรัม ผ่าน sample drop type ซึ่งต่อกับเครื่องผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง หลังจากผ่านกระบวนการ USST ทิ้งให้ตัวอย่างเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง ก่อนบรรจุตัวอย่างข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ในถุงพลาสติกปิดผนึกด้วยความร้อน (heat-sealed) เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสก่อนทำการวิเคราะห์คุณภาพในด้านต่างๆ ต่อไป

การตรวจสอบคุณภาพของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่

ตรวจสอบคุณภาพของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ไม่ผ่านกระบวนการ USST) ดังนี้

ค่าสี นำข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ มาวัดค่าด้วยเครื่องวัดสี (รุ่น DP-400 ยี่ห้อ Konica Minolta, ประเทศญี่ปุ่น) โดยบรรจุตัวอย่างใส่ลงในภาชนะทึบ เกลี่ยตัวอย่างจนเกือบเต็มกระบอก นำเครื่องวัดสีกดทับบนตัวอย่างจนแนบสนิท บันทึกค่าสีในระบบ CIE L* a* b*

ความหนาแน่น (Bulk density) โดยบรรจุตัวอย่าง 20 กรัม ลงในกระบอกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร เคาะกระบอกตวงจนกระทั่งปริมาตรของตัวอย่างคงที่ บันทึกปริมาตรที่ได้ คำนวณค่าความหนาแน่น

วิเคราะห์ลักษณะความหนืดของแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ ด้วยเครื่องตรวจสอบความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser) (รุ่น RVA Tecmaster ยี่ห้อ Perten, ประเทศ Australia) ดัดแปลงตามวิธีของ Rumruaytum *et al*. (2014) โดยเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ด้วยเครื่องบดแป้ง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช นำตัวอย่างจำนวน 3 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่ถ้วยอะลูมิเนียมผสมด้วยน้ำกลั่น 25 กรัม ใส่พาย (paddle) ลงในถ้วยอะลูมิเนียม เริ่มการวัดค่าที่ความเร็วของการกวน 160 รอบต่อนาที คงอุณหภูมิที่ 50 องศา-เซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 3.7 นาที คงไว้เป็นเวลา 2.5 นาที ลดอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 3.7 นาที และคงไว้ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 นาที บันทึกค่า ดังนี้ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสูงสุด (pasting temperature), ความหนืดสูงสุด (peak viscosity), ความหนืดสุดท้าย (final viscosity), ค่าการแตกตัว (breakdown) และค่าการคืนตัว (setback) โดยค่าความหนืดของแป้งที่ได้มีหน่วยเป็น RVU

การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่

เริ่มจากการสกัดตัวอย่าง โดยดัดแปลงตามวิธีของ Walter *et al.* (2013) ชั่งตัวอย่างแป้งข้าว 1 กรัม ผสมด้วยเมธานอล 80% ปริมาณ 20 ml กวนผสมด้วยเครื่อง magnetic stirrer ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หมุนเหวี่ยงตัวอย่างที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เก็บสารละลายที่ได้ที่อุณหภูมิ -20°C จนกระทั่งใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (2,2- Diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical scavenging activity assay ดัดแปลงตามวิธีของ Tananuwong and Tewaruth (2010) โดยปิเปต 0.1 mM DPPH methanol 950 µl ผสมกับสารละลายที่สกัดจากตัวอย่างข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ 50 µl เขย่าให้เข้ากัน และเก็บไว้ในที่มืด เป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance, A) ด้วยเครื่อง UV-spectrometer (รุ่น U2900 ยี่ห้อ Hitachi ประเทศญี่ปุ่น) ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร วิเคราะห์ผล EC_{50} (กรัม แป้งข้าว/กรัม DPPH) จากความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระสามารถลดอนุมูลอิสระของ DPPH ลงครึ่งหนึ่งของที่เริ่มต้น โดยวิเคราะห์จากกราฟความเข้มข้นของปริมาณตัวอย่างในสารละลาย DPPH และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (%) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ 1

$$\text{Radical scavenging activity (\%)} = [1-(A_{sample}/A_{reagent\ blank})] \times 100 \quad (1)$$

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content; TPC โดย Folin-Ciocalteu method) ดัดแปลงตามวิธีของ Daiponmak *et al*., (2010) นำสารละลายที่สกัดจากตัวอย่าง 0.5 ml ใส่ลงในหลอดทดลอง ผสม 10% Folin-ciocalteu's reagent 2.5 ml หลังจากนั้น 3 นาที เติมสารละลาย 7.5% sodium carbonate 2 ml ผสมให้เข้ากัน และวางทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำสารละลายที่ได้วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 765 nm นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน gallic acid (ไมโครกรัม gallic acid/กรัมตัวอย่าง)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในแต่ละการทดลองมีการทำ 2 ซ้ำ และในแต่ละตัวอย่างทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพจำนวน 3 ซ้ำ แสดงเป็น ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean$\pm$SD) วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดย one-way analysis of variance (ANOVA) โดยใช้โปรแกรม SPSS (version 12, SPSS Inc., Chicago, IL, USA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's multiple-range test

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การใช้เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีต่อคุณภาพของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพของข้าวไรซ์เบอรี่ด้านค่าสีหลังผ่านกระบวนการ USST พบว่าความสว่าง (L*) ของข้าวไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST มีค่าลดลงแตกต่างกับตัวอย่างควบคุม ($p<0.05$) ค่าสี a* (ค่าความเป็นสีแดง-เขียว) และ b* (ค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน) ของตัวอย่างข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ไม่มีความแตกต่างกับตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$) และค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE^*) ของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ไม่ผ่านกระบวนการ USST พบว่าค่า ΔE^* อยู่ในช่วง 1.03$\pm$0.11 ถึง 1.63$\pm$0.5 ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงสี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$) (Figure 2 และ Table 1) ข้าวกล้องไรซ์เบอรี่มีค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$) (Table 1) แสดงว่าอุณหภูมิและจำนวนรอบในการใช้ USST ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีและความหนาแน่นของเมล็ดข้าวไรซ์เบอรี่



Figure 2 Rice grains (Riceberry cultivar) treated with different conditions by USST; untreated (A), 250°C 5 cycles (B), 250°C 10 cycles (C), 300°C 5 cycles (D), 300°C 10 cycles (E), 350°C 5 cycles (F), 350°C 10 cycles (G).

Table 1 Color parameters, ΔE^* and bulk density of untreated and USST-treated riceberry grains.

USST condition	Color parameters			ΔE^*	Bulk density
	L*	a*	b*		(g.mL^{-1})
untreated	35.47±0.36^{a}	4.40±0.17^{a}	-1.46±0.16^{a}	-	0.87+0.04^{a}
250°C 5 cycles	34.64±0.06^{b}	5.00±0.28^{a}	-1.47±0.06^{a}	1.11±0.17^{a}	0.80+0.02^{a}
250°C 10cycles	34.60±0.27^{b}	4.98±0.52^{a}	-1.36+0.42^{a}	1.25±0.13^{a}	0.81+0.03^{a}
300°C 5 cycles	34.54+0.14^{b}	4.61±0.27^{a}	-1.54±0.09^{a}	1.03±0.11^{a}	0.80+0.02^{a}
300°C 10cycles	34.74±0.64^{b}	5.27±0.70^{a}	-1.03±0.55^{a}	1.63±0.51^{a}	0.83+0.05^{a}
350°C 5 cycles	34.36±0.17^{b}	4.49±0.16^{a}	-1.77±0.18^{a}	1.19±0.17^{a}	0.81+0.03^{a}
350°C 10cycles	34.54±0.56^{b}	4.79±0.46^{a}	-1.49±0.38^{a}	1.25±0.16^{a}	0.80+0.02^{a}

$^{a-b}$ Means ± SD with different lowercase superscript letters within a column were significantly different ($p<0.05$)

จากการตรวจสอบคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ด้วยเครื่อง RVA พบว่า แป้งข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST มีค่าการแตกตัว (breakdown), ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity), ค่าการคืนตัว (setback) และค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสูงสุด (pasting temperature) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังแสดงใน Table 2

ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST พบว่าอยู่ในช่วง 103.44±1.05 ถึง 136.08±0.76 RVU ซึ่งการใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งสูงขึ้นและจำนวนรอบของการผ่านกระบวนการมากขึ้นทำให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) การใช้อุณหภูมิและเวลาของกระบวนการ USST เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า breakdown ลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งค่า breakdown เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความคงตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับแรงกวน (Rumruaytum *et al.*, 2014) แสดงว่าแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST ทนต่อการกวนมากกว่าข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ไม่ผ่านกระบวนการ USST ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST พบว่าอยู่ในช่วง 202.63±0.67 ถึง 239.92±1.16 RVU เมื่ออุณหภูมิและจำนวนรอบของ

กระบวนการใช้ USST เพิ่มขึ้น พบว่าค่าความหนืดสุดท้ายมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ค่าการคืนตัว (setback) เป็นค่าที่แสดงถึงระดับการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยถ้าค่า setback สูงจะเกิดรีโทรเกรเดชันมาก (Soponronnarit *et al*., 2008) ค่า pasting temperature ของแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST มากกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ พบว่ากระบวนการ USST ทำให้เม็ดแป้งของข้าวไรซ์เบอรี่มีการทนต่อแรงกวนสูงขึ้น เมล็ดข้าวเกิดเจลาติไนเซชันบางส่วน ส่งผลต่อสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอรี่

Table 2 Pasting properties of flour from untreated and USST-treated riceberry.

USST condition	Viscosity (RVU)				Pasting temperature (°C)
	Peak viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback	
untreated	137.14±0.84^{a}	27.69±0.59^{a}	235.81±1.43^{a}	98.67±0.65^{bc}	89.43±0.06^{b}
250°C 5cycle	136.08±0.76^{a}	22.94±0.42^{c}	239.92±1.16^{a}	103.83±0.55^{a}	90.08±0.46^{a}
250°C 10cycle	117.19±0.64^{c}	25.22±0.10^{b}	202.69±0.35^{c}	85.50±0.36^{e}	90.07±0.45^{a}
300°C 5cycle	126.23±0.85^{b}	22.44±0.31^{c}	223.83±1.57^{b}	97.60±0.78^{bcd}	90.10±0.40^{a}
300°C 10cycle	111.83±3.57^{d}	16.23±0.28^{e}	206.87±7.85^{c}	95.03±4.30^{cd}	90.48±0.32^{a}
350°C 5cycle	113.04±3.85^{d}	17.90±0.97^{d}	207.77±6.30^{c}	94.73±2.48^{d}	90.25±0.00^{a}
350°C 10cycle	103.44±1.05^{e}	11.23±0.40^{f}	202.63±0.67^{c}	99.19±0.453^{b}	90.68±0.49^{a}

$^{a-f}$ Means ± SD with different lowercase superscript letters within a column were significantly different ($p<0.05$)

การใช้เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีต่อสมบัติด้านความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่

คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวไรซ์เบอรี่หลังจากผ่านกระบวนการ USST พบว่าที่สภาวะต่างๆ ผลของคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและจำนวนรอบในการสัมผัสกับไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Table 3 Antioxidant activity (EC_{50}) (g flour/g DPPH) of riceberry after USST treatment.

Cycles	Temperature (°C)		
	250	300	350
5	74.83±3.67^{a}	62.90±0.85^{b}	59.62±1.43^{b}
10	70.67±5.08^{a}	68.77±3.41^{ab}	64.88±1.20^{b}

$^{a-b}$ Means ± SD with different lowercase superscript letters within a row were significantly different ($p<0.05$)

ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (EC_{50}) คือความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถลดปริมาณอนุมูลอิสระ (DPPH) เริ่มต้นลงได้ 50% ของตัวอย่าง ดังนั้นถ้าค่า EC_{50} ของตัวอย่างต่ำแสดงว่าตัวอย่างมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง ข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ USST มีค่า EC_{50} เท่ากับ 70.08±4.84 กรัมตัวอย่าง/กรัม DPPH ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

เพิ่มขึ้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งผลของอุณหภูมิทำให้เกิดการปลดปล่อยสารต้านอนุมูลอิสระจากตัวอย่าง ขณะที่จำนวนรอบของการใช้กระบวนการ USST ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของข้าวไรซ์เบอรี่มีแนวโน้มลดลง (Table 3) จากการทดลองพบว่า กระบวนการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งส่งผลต่อค่าความสามารถการต้านอนุมูลอิสระ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi *et al*. (2006) ซึ่งศึกษาผลของกระบวนการใช้ความร้อนต่อกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของเห็ดหอม พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่มากขึ้นทำให้กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของเห็ดหอมมีค่าเพิ่มขึ้น

Table 4 Total phenolic content (μg gallic acid/ g sample) of riceberry after USST treatment.

Cycles	Temperature (°C)		
	250	300	350
5	2138.33±58.93^{b}	2169.17±31.82^{b}	2395.83±83.67^{a}
10	2150.09±14.14^{b}	2566.67±82.50^{a}	2195.83±45.96^{b}

$^{a-c}$ Means ± SD with different lowercase superscript letters within a row were significantly different ($p<0.05$)

ข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ไม่ผ่านกระบวนการ USST มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด 2077.50±1.18 ไมโครกรัม gallic acid/ กรัมตัวอย่าง ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งข้าวกล้องไรซ์เบอรี่มีค่าแตกต่างกัน (Table 4) ข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ที่ผ่านกระบวนการ USST จำนวน 5 รอบ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามลำดับ และจากการใช้กระบวนการ USST จำนวน 10 รอบ พบว่าปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าสูงสุดเมื่อใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 350 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการซึ่งทำลายพันธะเอสเตอร์ระหว่างกรดฟีนอลิกและองค์ประกอบของผนังเซลล์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim *et al.* (2011) ที่ศึกษาผลของกระบวนการคั่ว (roast process) ต่อถั่วเหลืองผิวดำเมล็ดเล็ก (small black soybean) ซึ่งมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการคั่ว เนื่องจากอุณหภูมิของกระบวนการมีผลให้เยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์แตกเกิดการปลดปล่อยสารประกอบฟีนอลิกที่ละลายน้ำได้จากพันธะเอสเตอร์

สรุป

การใช้เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (USST) ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี ค่าความหนาแน่น และลักษณะปรากฏของข้าวกล้องไรซ์เบอรี่ อุณหภูมิและเวลาของกระบวนการ USST ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าว ข้าวที่ผ่านกระบวนการ USST ทนต่อแรงกวนมากขึ้น อุณหภูมิ 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มความสามารถการต้านอนุมูลอิสระและทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มมากขึ้น การใช้เทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถปรับปรุงคุณภาพของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอรี่ด้านสมบัติการต้านอนุมูลอิสระได้ ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพจากข้าวไรซ์เบอรี่ที่มีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระสูงทั้งยังมีความปลอดภัยจากจุลินทรีย์และสารเคมี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท JSP Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น สำหรับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ultra superheated steam equipment)

เอกสารอ้างอิง

Choi, Y., S.M. Lee, J. Chun, H.B. Lee and J. Lee. 2006. Influence of heat treatment on the antioxidant activities and polyphenolic compounds of Shiitake (*Lentinus edodes*) mushroom. **Food Chemistry**. 99(2): 381-387.

Daiponmak, W., P. Theerakulpisut, P. Thanonkao, A. Vanavichit and P. Prathepha. 2010. Changes of anthocyanin cyanidin-3-glucoside content and antioxidant activity in Thai rice varieties under salinity stress. **Science Asia**. 36(4): 286.

Guevarra, D.S., J.L. Luces, R.G. Baldovino and M.L. Vista. 2015. A PLC-based adaptive control of superheated steam treatment system (SSTS) for stabilized brown rice (SBR). **Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists**. Vol. 1.

Kim, H.G., G.W. Kim, H. Oh, S.Y. Yoo, Y.O. Kim and M.S. Oh. 2011. Influence of roasting on the antioxidant activity of small black soybean (*Glycine max* L. Merrill). **LWT-Food Science and Technology**. 44(4): 992-998.

Leardkamolkarn, V., W. Thongthep, P. Suttiarporn, R. Kongkachuichai, S. Wongpornchai and A. Wanavijitr. 2011. Chemopreventive properties of the bran extracted from a newly-developed Thai rice: The Riceberry. **Food Chemistry**. 125(3): 978-985.

Rumruaytum, P., C. Borompichaichartkul and V. Kongpensook. 2014. Effect of drying involving fluidisation in superheated steam on physicochemical and antioxidant properties of Thai native rice cultivars. **Journal of Food Engineering**. 123: 143-147.

Soponronnarit, S., M. Chiawwet, S. Prachayawarakorn, P. Tungtrakul and C. Taechapairoj. 2008. Comparative study of physicochemical properties of accelerated and naturally aged rice. **Journal of Food Engineering**. 85(2): 268-276.

Tananuwong, K. and W. Tewaruth. 2010. Extraction and application of antioxidants from black glutinous rice. **LWT - Food Science and Technology**. 43(3): 476-481.

Walter, M., E. Marchesan, P.F.S. Massoni, L.P. da Silva, G.M.S. Sartori and R.B. Ferreira. 2013. Antioxidant properties of rice grains with light brown, red and black pericarp colors and the effect of processing. **Food Research International**. 50(2): 698-703.

Wu, J., J. Chen, W. Liu, C. Liu, Y. Zhong, D. Luo, Z. Li and Z. Huang. 2014. Selective peroxidase inactivation of lightly milled rice by superheated steam. **Journal of Cereal Science**. 60(3): 623-630.

การผลิตแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปรโดยวิธีการย่อยสลาย
Production of Sangyod Rice Flour by Hydrolysis Treatment

พัทธ์ธิดา เพชรศร[1*] เพ็ญขวัญ ชมปรีดา[1] และ วิชัย หฤทัยธนาสันติ์[1]

Phatthida Petchsorn[1*], Penkwan Chompreeda[1] and Vichai Haruthaithanasan[1]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปรโดยวิธีการย่อยสลาย โดยให้ได้ค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (DE) ใกล้เคียงกับมอลโตเด็กซ์ตรินการค้าที่ DE 10-12 เพื่อนำไปใช้เป็นสารทดแทนไขมัน โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย โดยการจัดการทดลองแบบแฟคทอเรียลในแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ ศึกษา 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ 2 ระดับ (ร้อยละ 0.025 และ 0.050 ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง) และ เวลาการย่อยสลาย 4 ระดับ (15, 30, 45 และ 60 นาที) คัดเลือกสภาวะที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากสภาวะที่ให้ค่า DE 10-12 นำค่าทางสถิติที่แตกต่างมาวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่า ช่วงสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ ร้อยละ 0.025 - 0.050 (w/w) และเวลาการย่อยสลาย 23 – 57 นาที สุดท้ายศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำแห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 3 ระดับ (110, 120 และ 130°C) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 120 °C เนื่องจากความชื้นของแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปรที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด จึงเลือกสภาวะที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ร้อยละ 0.038, เวลา 38 นาที และทำแห้งที่ 120 °C ทำการขยายกำลังการผลิต พบว่าค่า DE จากการผลิตมีค่าสูงกว่าค่า DE ที่คำนวณจากสมการพื้นผิวตอบสนอง ค่าคุณภาพของแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปรที่ได้ มีดังนี้ น้ำตาลรีดิวซ์ ร้อยละ 7.64, น้ำตาลทั้งหมด ร้อยละ 68.02, DE 11.23, ค่าสี L* 74.53, a* 5.72, b* 10.09, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ 0.30 และ ความชื้น ร้อยละ 3.85

ABSTRACT

The objective of this study was produced the Modified Sangyod Rice Flour (MSRF) by hydrolysis treatment. Determination similar to the commercial maltodextrin DE 10-12 to be used as a fat replacer. First, the study optimum hydrolysis condition was investigated used factorial experiment in CRD,consider 2 factors : enzyme concentration 2 levels (0.025 and 0.050 %(w/dry substrate)) and hydrolysis time 4 levels (15, 30, 45 and 60 minutes). The result used RSM to analyze. This should be the criteria for selecting the optimum condition was dextrose equivalent (DE) similar to commercial maltodextrin (DE 10 - 12). The optimum hydrolysis condition was enzyme concentration 0.025 - 0.050 % (w/dry substrate)) and hydrolysis time 23 – 57 minutes. Therefore the study optimum drying temperature used twin screw drum drier 3 levels (110, 120 and 130 °C). The result showed optimum drying temperature 120 °C because the moisture content below standard. Finally, selected the optimum condition was the enzyme concentration 0.038 %, 38 minutes and the drying temperature 120 °C to expand scale production. The quality of MSRF had reducing sugar 7.64 %, total sugar 68.02 %, DE 11.23, color L* 74.53, a* 5.72, b* 10.09, water activity 0.30and moisture content 3.85 %

Key Words: Modified Sangyod Rice Flour, Dextrose Equivalent, Hydrolysis

* Corresponding author; e-mail address: **phatthida.p@gmail.com**

[1] ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การดัดแปรแป้งเป็นการนำแป้งดิบมาเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือกายภาพจากเดิม เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในนั้น คือ การย่อยสลาย (Hydrolysis)โดยการใช้เอนไซม์หรือกรด เพื่อย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก ได้ผลิตภัณฑ์ เช่น มอลโตเด็กซ์ตริน (Maltodextrin) (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2550) ซึ่งสามารถใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารได้ โดยคุณสมบัติขึ้นอยู่กับค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (DE) การผลิตมอลโตเด็กซ์ตรินนั้นสามารถผลิตได้จากแป้งหลายชนิด การศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดัดแปรแป้งให้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับมอลโตเด็กซ์ตรินทางการค้า DE 10-12 ซึ่งนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ เพราะให้เนื้อสัมผัสที่นุ่ม เพิ่มความรู้สึกภายในปาก รักษาความชื้น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชุ่มฉ่ำ (The American Dietetic Association, 2005) โดยนำข้าวพันธุ์สังข์หยดเป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดพัทลุง เป็นข้าวอะมิโลสต่ำ มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีแดง ซึ่งประกอบด้วยโพลีฟีนอลิก (Polyphenolic compound) จำนวนมาก มีคุณสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชั่นจากธรรมชาติ จึงนำมาเป็นวัตถุดิบในการดัดแปรแป้ง ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวพันธุ์สังข์หยดและนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ เป็นการเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่สนใจด้านสุขภาพ

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ

1.1 แป้งข้าวสังข์หยดเตรียมจากข้าวสังข์หยดเต็มเมล็ด นำมาคัดสิ่งปนเปื้อนออก แล้วนำมาบดด้วยเครื่อง Pin Mill ร่อนผ่านตะแกรงความละเอียด 120 เมช บรรจุในถุงพลาสติก Polyethylene เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

1.2 เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส BAN® 480 L มีแอคทิวิตี 480 KNU ต่อกรัม (Batch: ADN044015, Novo Nordisk, Denmark) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Brenntag Ingredients (Thailand) Public Company Limited. ผลิตจากเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus amyloliquefaciens*.

1.3 มอลโตเด็กซ์ตรินทางการค้า DE 10-12 จากบริษัท เบอร์ลี่ ยุคเกอร์ ฟู้ด จำกัด

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแป้งข้าวสังข์หยด

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแป้งข้าวสังข์หยด โดยการจัดการทดลองแบบแฟคทอเรียลในแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลาย 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ 2 ระดับ คือ ร้อยละ 0.020 และ 0.050 %(w/ dry substrate) และระยะเวลาการย่อยสลาย 4 ระดับ คือ 15, 30, 45 และ60 นาที โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายแป้งข้าวสังข์หยดความเข้มข้นร้อยละ 35 (w/ w) ปรับ pH ให้ได้ 6.5 โดยใช้ 0.5 N NaOH เติมเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสตามความเข้มข้นที่ต้องการศึกษา บ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส โดยกวนตลอดเวลา บ่มไว้ตามเวลาที่กำหนด

เมื่อครบเวลานำตัวอย่างขึ้นมาแช่น้ำแข็งทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา แล้วต้มในน้ำเดือดให้ได้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นำมาวิเคราะห์ค่าคุณภาพ ดังนี้

2.1 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง (Somogyi, 1944) วิเคราะห์โดยการเตรียมสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร เติม Alkaline Reagent 1 มิลลิลิตร ต้มในน้ำเดือด 15 นาที เมื่อครบเวลา นำขึ้นมาแช่น้ำแข็งทันที แล้วเติมสารละลาย Nelson Reagent 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 520 nm

2.2 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Dubois *et al.,* 1956) วิเคราะห์โดยการเตรียมสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร เติมสารละลายฟีนอลร้อยละ 5 จำนวน 1 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟูริก 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 485 nm

2.3 ค่า DE คำนวณจาก $\frac{\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง}}{\text{ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด}} \times 100$

วิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนโดยวิธี One - way Analysis of Variance โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Thailand) Co., Ltd. Version 12.0 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT (Duncan's Multiple Rang Test) (อนุวัตร, 2549) และนำค่าที่มีความแตกต่างกันทางสถิติมาวิเคราะห์โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เพื่อคัดเลือกสภาวะย่อยสลายที่เหมาะสม (ดวงกมล, 2551)

พิจารณาสมการที่มีระดับความเชื่อมั่นมากกว่าร้อยละ 95 นำมาสร้างกราฟคอนทัวร์ของปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (DE) เพื่อคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (DE) ในช่วงเดียวกันกับมอลโตเด็กซ์ตรินการค้าที่ DE 10-12

3. การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำแห้งแป้งข้าวพันธุ์สังข์หยดดัดแปร

นำตัวอย่างที่ได้จากการคัดเลือกสภาวะการย่อยสลายที่เหมาะสม มาศึกษาอุณหภูมิการทำแห้งที่เหมาะสมโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ โดยควบคุมระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง 0.15 เซนติเมตร ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 1.05 นาที/รอบ ศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการทำแห้ง 3 ระดับ คือ 110, 120 และ 130 องศาเซลเซียส นำมาวิเคราะห์ค่าคุณภาพ ดังนี้

- ความชื้น (AOAC, 2000) วิเคราะห์โดยการชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักแน่นอนประมาณ 2 กรัม ใส่ในจานอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอน แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่

- ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ด้วยเครื่อง AQUA Lab (รุ่น CX3TE, Decagon Drivce, USA)

- ค่าสีระบบ CIE Lab ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (รุ่น CM3500d, Minolta CO., Ltd, Japan) วัดค่าแสงสะท้อน โดยใส่ตัวอย่างลงใน petri dish ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมสังเกตการณ์ 10 องศา

- ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง ตามข้อ 2.1

- ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ตามข้อ 2.2

- ค่า DE ตามข้อ 2.3

วิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนโดยวิธี One - way Analysis of Variance และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT (Duncan's Multiple Rang Test) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Thailand) Co., Ltd. Version 12.0

4. การศึกษาค่าคุณภาพของแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปร

คัดเลือกสภาวะการย่อยสลายและอุณหภูมิการทำแห้งที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ขยายกำลังการผลิตเป็น 2 กิโลกรัม วัดค่าคุณภาพแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปร ดังนี้

- ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ด้วยเครื่อง AQUA Lab (รุ่น CX3TE, Decagon Drivce, USA)

- ค่าสีระบบ CIE Lab ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (รุ่น CM3500d, Minolta CO., Ltd, Japan) วัดค่าแสงสะท้อน โดยใส่ตัวอย่างลงใน petri dish ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมสังเกตการณ์ 10 องศา

- ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง ตามข้อ 2.1

- ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ตามข้อ 2.2

- ค่า DE ตามข้อ 2.3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแป้งข้าวสังข์หยด

การเตรียมสารละลายน้ำแป้งข้าวสังข์หยดก่อนนำไปศึกษา พบว่าความเข้มข้นร้อยละ 35 (w/ w) มีความเหมาะสม เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนระหว่างกระบวน การย่อยสลาย โมเลกุลแป้งในสารละลายจะมีการดูดซับน้ำและพองตัว ทำให้เกิดความหนืดมากขึ้น ทำให้การกวนสารละลายน้ำแป้งเพื่อให้เอนไซม์ทำงาน ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และค่า DE ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายน้ำแป้งร้อยละ 40 (w/ w) ขึ้นไป ในระหว่างการให้ความร้อนระหว่างกระบวนการผลิตมีความหนืดมาก บางส่วนจับเป็นก้อนแข็ง ไม่สามารถกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องลดความเข้มข้นของสารละลายน้ำแป้ง พบว่าความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 35 (w/ w) ลงมา ในระหว่างการให้ความร้อนระหว่างกระบวนการผลิต มีความหนืดที่สามารถกวนสารละลายได้อย่างสม่ำเสมอ มีประสิทธิภาพในการย่อยสลาย แต่เมื่อหลังจากกระบวนการผลิตพบว่ามีความหนืดต่ำลง เนื่องจากเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส ทำหน้าที่ตัดพันธะแอลฟา 1,4 ในโมเลกุลแป้ง จึงทำให้ความหนืดลดลง (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2550) ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ต้องมีความหนืดเพียงพอที่จะสามารถจะติดบนผิวลูกกลิ้งได้ ซึ่งสารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 35 (w/ w) ติดบนผิวลูกกลิ้งได้ดีและให้ปริมาณผลผลิตมากกว่า เมื่อเทียบสารละลายความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 35 (w/ w) จึงเลือกความเข้มข้นของสารละลายนี้เพื่อใช้ศึกษาต่อไป

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแป้งข้าวสังข์หยด พบว่าความเข้มข้นของเอนไซม์และเวลาในการย่อยสลาย มีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ($p \leq 0.05$) โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์และเวลาในการย่อยสลาย (Table 1) แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดไม่ได้เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเวลา เนื่องจากในช่วงแรกของการย่อยสลาย เอนไซม์จะสามารถเข้าไปย่อยในโมเลกุลของแป้งได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อย่อยไปจนเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งรบกวนการทำงานของเอนไซม์ เอนไซม์จึงทำงานได้ช้าลงสอดคล้องกับงานวิจัยของสุนีย์ (2539)

Table 1 Reducing sugar % (dry basis), total sugar % (dry basis) and DE of MSRF and commercial maltodextrin

Condition Enzyme% (w/ dry substrate) /Time(minutes)	Reducing sugar % (dry basis)	Total sugar % (dry basis)	DE
0.025/ 15	4.32 ± 0.08 ^{g}	63.56 ± 0.08 ^{g}	6.79 ± 0.11^{f}
0.025/ 30	5.24 ± 0.14 ^{f}	65.06 ± 0.23 ^{f}	8.03 ± 0.16^{e}
0.025/ 45	8.02 ± 0.04 ^{c}	66.93 ± 0.04 ^{c}	10.63 ± 0.05^{c}
0.025/ 60	8.72 ± 0.13 ^{b}	67.49 ± 0.76 ^{b}	11.61 ± 0.28^{b}
0.050/ 15	5.56 ± 0.11 ^{e}	66.02 ± 0.04 ^{e}	8.40 ± 0.09^{d}
0.050/ 30	7.32 ± 0.03 ^{d}	66.51 ± 0.15 ^{d}	10.89 ± 0.11^{c}
0.050/ 45	9.11 ± 0.06 ^{a}	68.83 ± 0.04 ^{a}	13.05 ± 0.21^{a}
0.050/ 60	8.92 ± 0.01 ^{a}	69.67 ± 0.34 ^{b}	12.96 ± 0.04^{a}

Note a – g Means are significantly different ($p \leq 0.05$)

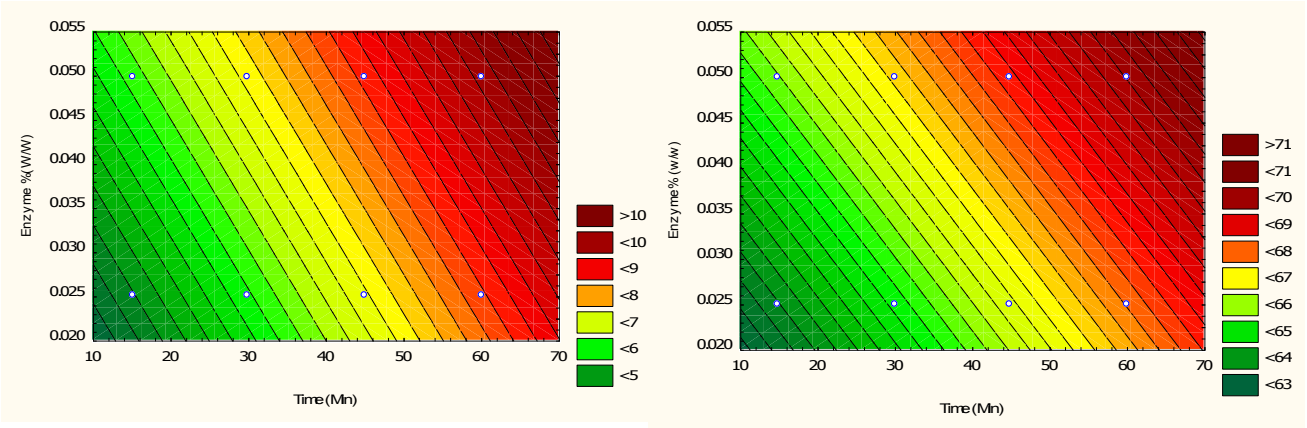
เมื่อนำข้อมูลค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่ง ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และ DE ที่มีความแตกต่างกันทางสถิติมาวิเคราะห์โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Table 2) จากนั้นนำสมการมาสร้างแผนภาพคอนทัวร์ของปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Figure 1 a และ b) ต่อความเข้มข้นเอนไซม์และเวลา และค่า DE ต่อความเข้มข้นเอนไซม์และเวลา เลือกช่วงสภาวะการย่อยสลายที่เหมาะสมจากที่ให้ค่าสมมูลเด็กซ์โตรส DE 10-12 (Figure 2) ซึ่งเป็นช่วงเดียวกับกับมอลโตเด็กซ์ตรินการค้า พบว่าสภาวะการย่อยสลายที่เหมาะสมจากการศึกษาคือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ ร้อยละ 0.025- 0.050 (w/ substrate) เวลา 23-57 นาที จึงคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย 5 สภาวะที่อยู่ในช่วงที่เลือกจากแผนภาพคอนทัวร์ คือ ความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ 0.025 (w/w) เวลา 48 นาที ความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ 0.038 (w/w) เวลา 30, 40 และ 48 นาที ตามลำดับ และความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ 0.050 (w/w) เวลา 30 นาที เพื่อนำไปศึกษาในขั้นต่อไป

Table 2 The predictive regression models for reducing sugar content % (dry basis), total sugar content % (dry basis)and DE of MSRF

Predictive model	R^2	Model significance
reducing sugar content = 2.0619 + 0.0829 x_1 + 56.1500 x_2	0.897	0.000
total sugar content = 60.3925 + 0.0898 x_1 + 79.9000 x_2	0.868	0.000
DE = 3.9842 + 0.1105 x_1 + 72.3525 + x_2	0.896	0.000

Note x_1 = time (minute)

x_2 = enzyme (% dry substate)



(a : reducing sugar content) (b : total sugar content)

Figure 1 Contour plot between hydrolysis time and volume of enzyme to reducing sugar content % (dry basis) (a); total sugar % (dry basis)

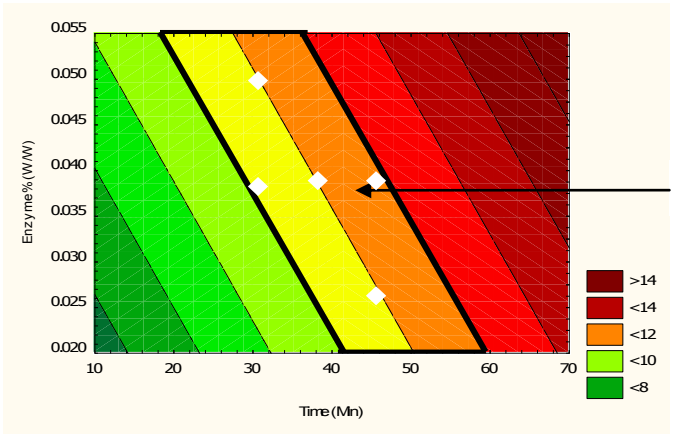


Figure 2 Contour plot between hydrolysis time and volume of enzyme to DE

2. ผลของการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำแห้งแป้งข้าวพันธุ์สังข์หยดดัดแปร

แป้งข้าวพันธุ์สังข์หยดที่ผ่านการย่อยสลายในสภาวะที่คัดเลือกทั้ง 5 สภาวะ นำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ พบว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แป้งข้าวพันธุ์สังข์หยดดัดแปรยังมีลักษณะเปียกบางส่วน หลุดร่อนออกจากผิวหน้าลูกกลิ้งได้ค่อนข้างยาก มีลักษณะเป็นแผ่นเล็ก ๆ และบางส่วนหลุดออกมาเป็นก้อนเหนียวแข็ง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แป้งข้าวสังข์พันธุ์หยดดัดแปรมีลักษณะแห้ง หลุดร่อนออกจากผิวหน้าลูกกลิ้งได้ค่อนข้างดี มีลักษณะเป็นผงละเอียดโดยส่วนมากและมีส่วนน้อยหลุดเป็นแผ่นเล็ก ๆ และที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส แป้งข้าวพันธุ์สังข์หยดดัดแปรมีลักษณะแห้ง หลุดร่อนออกจากผิวหน้าลูกกลิ้งได้พอสมควร และมีบางส่วนที่ไหม้ติดผิวลูกกลิ้ง ส่วนที่หลุดร่อนออกมามีลักษณะเป็นผงละเอียด จากผลที่ได้จึงคัดเลือกแป้งข้าวพันธุ์สังข์หยดดัดแปรที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มาวิเคราะห์ค่าคุณภาพ พบว่าความชื้นของแป้งข้าวพันธุ์สังข์หยดดัดแปรทั้ง 5 สภาวะ ต่ำกว่า 13 % ตามมาตรฐานที่กำหนด (มอก. 1073, 2535) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิ่ง และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีปริมาณสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการพื้นผิวตอบสนองเล็กน้อย (Table 3) โดยทุกสภาวะมีค่าสมมูลเด็กซ์โตรส (DE) อยู่ในช่วงที่ต้องการ (DE 10 -12) ยกเว้นที่สภาวะความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ0.038 (w/ dry substrate) เวลา 48 นาที และความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ0.038 (w/ dry substrate) เวลา 48 นาที ให้ค่า DE 12.05 และ 12.81 ตามลำดับ สูงกว่าช่วง DE ที่ต้องการ จึงเลือกสภาวะความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ0.038 (w/ dry substrate) เวลา 30 นาที เนื่องจากต้นทุนการผลิตถูกกว่า ไปทำการขยายกำลังการผลิตต่อไป

Table 3 Characterization of MSRF 5 conditions after drying using twin screw drum drier at 120 °C

Condition Enzyme% (w/ dry substrate) / Time(minutes)	Moisture	Water activity	Reducing sugar	Total sugar	DE
0.025/ 48	2.57 ± 0.03^{b}	0.17 ± 0.00^{bc}	7.95 ± 0.06^{b}	66.70 ± 0.17^{b}	11.91±0.05^{b}
0.038 / 30	3.26 ± 0.04^{a}	0.19 ± 0.00^{a}	7.62 ± 0.04^{c}	67.70 ± 0.61^{a}	11.25± 0.05^{d}
0.038 / 40	2.54 ± 0.05^{b}	0.18 ± 0.00^{b}	8.01 ± 0.03^{b}	66.47 ± 0.05^{b}	12.05± 0.04^{b}
0.038 / 48	2.55 ± 0.03^{b}	0.17 ± 0.00^{c}	8.54 ± 0.06^{a}	66.69 ± 0.12^{b}	12.81± 0.06^{a}
0.050 / 30	2.53 ± 0.04^{b}	0.18 ± 0.00^{b}	7.92 ± 0.03^{b}	66.39 ± 0.08^{b}	11.94 ±0.03^{c}

Note a – c Means are significantly different ($p \leq 0.05$)

3. การศึกษาค่าคุณภาพของแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปร

จากการขยายกำลังการผลิตเป็น 2 กิโลกรัม โดยใช้สภาวะการย่อยสลาย คือความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ 0.038 (w/ dry substrate) เวลา 30 นาที และอุณหภูมิการทำแห้ง120 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าคุณภาพของแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปรที่ได้ มีดังนี้ น้ำตาลรีดิวซ์ ร้อยละ 7.64, น้ำตาลทั้งหมด ร้อยละ 68.02, DE 11.23, ค่าสี L* 74.53, a* 5.72, b* 10.09, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ 0.30 และ ความชื้น ร้อยละ 3.85

สรุป

สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปรเพื่อให้ได้ค่า DE 10-12 คือ เตรียมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 35 (w/ w) ทำการย่อยสลายที่สภาวะความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ 0.038 (w/ dry substrate) เวลา 30 นาที และนำไปทำแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าคุณภาพของแป้งข้าวสังข์หยดดัดแปรที่ได้ มีดังนี้ น้ำตาลรีดิวซ์ ร้อยละ 7.64, น้ำตาลทั้งหมด ร้อยละ 68.02, DE 11.23, ค่าสี L* 74.53, a^* 5.72, b^* 10.09, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ 0.30 และ ความชื้น ร้อยละ 3.85

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2550. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 4. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดวงกมล ลีมจันทร์, วิษฐิดา จันทราพรชัย และ วิชัย หฤทัยธนาสันติ์. 2551. การสกัดแอนโทไซยานินจากข้าวเหนียวดำ, น. 320-327. *ใน* **รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46 (สาขาอุตสาหกรรมเกษตร)**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

สุนีย์ โชตินีรนาท. 2539. **การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกากมันสำปะหลังโดยใช้เอนไซม์และอัลตราฟิลเตรชั่น**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนุวัตร แจ้งชัด. 2555. **สถิติสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการประยุกต์**. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรพิน ภูมิภมร. 2533. **การผลิตมอลโตเด็กซ์ตรินจากแป้งข้าวและแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส**. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

AOAC. 2000. **Official Method of Analysis of AOAC international.** 17th ed. The Association of Official Analysis Chemists. Virginia.

Dubois, M., Gills, K. A., Hamilton, J. K., Reber, P. A. and Smith, F. 1956. Colorimetric methods for determination of sugar and related substances. **Analytical Chem.** 28: 350-355.

Somogyi, M. 1952. Notes on Sugar Determination. **Journal of Biological Chem.** 195: 19-23.

The American Dietetic Association. 2005. Position of the American Dietetic Association : Fat Replacers. **Journal of the American Dietetic Association.** 105: 266-275.

Yusraini, E., P. Hariyadi. and F. Kusnandar. 2013. Preparation and partial characterization of low dextrose equipvalent (DE) maltodextrin from banana starch produced by enzymatic hydrolysis. **Starch/Starke.** 65: 312-321.

Vassiliki, P. and O. Vassiliki. 2013. The Effect of Fat Replacer on Batter and Cake Properties. **Journal of Food Science.** 78: 1495-1502.

Effect of replacing wheat flour with germinated brown rice flour on the quality of cookies

Sukhontha Sukhonthara[1*]

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the effect of replacing wheat flour with germinated brown rice on quality of cookies. The replacement of wheat flour with germinated brown rice (GBR) flour at the levels of 0 (control), 25, 50, 75 and 100% by weight of whole wheat flour was carried out. The L*, a* and b* value, texture (hardness and crispness) and sensory evaluation (color, flavour and overall preferences) of cookies at 25% GRB flour were no significantly difference compare with control (cookies with whole wheat flour) ($p>0.05$). Consumer test were conducted by 100 consumers in Phetchaburi province and the data showed that cookies at 25% GRB flour had higher sensory score than that of commercial cookie ($p\leq0.05$).

Key Words: germinated brown rice, cookie, sensory, texture analysis, quality

* Corresponding author; e-mail address: **sukontara@yahoo.com**

[1] Division of Applied Food and Nutrition, Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Thailand

INTRODUCTION

Rice is consumed by over half the world's population, Ninety percent of which is in Asia (Nokkoull and Wichitparp, 2013). The major rice growing countries are Thailand, China, India, Indonesia, Bangladesh, Burma, Vietnam, Japan and the Philippines (Wanyo *et al*., 2009). Brown rice (*Oryza sativa* L.) has higher nutritional components especially dietary fibre, vitamins, phenolic compounds and antioxidants than ordinary white rice grain (Pitiwiwattanakul *et al*., 2011). Germinated brown rice (GBR) is increasing in popularity due to increased awareness of its health benefits - mainly the amplified levels of GABA (Kaosa-ard and Songsermpong, 2012). GABA is a neurotransmitter in the brain and spinal cord of mammals, and induces hypotensive, diuretic, and tranquillizing effects (Karladeea and Suriyong, 2012). Cookies are snacks which are widely consumed all over the world especially by children (Madukwe *et al*., 2013). They are mainly prepared with wheat flour of which gluten, the major protein constituent of Wheat flour, is considered to be responsible for Celiac disease. Rice flour is considerably lower protein content compared with wheat flour and does not contain gluten (Wanyo *et al*., 2009). Therefore, substitution of wheat flour with GBR flour from local brown rice grains (Phetchaburi 1 brown rice) in cookies will increase the nutrition value and also provide health benefits to consumers. This attempt was made to produce better value adding to GBR flour and develop hearty cookie for individual suffering from gluten allergy.

MATERIALS AND METHODS

Preparation of GBR

Local brown rice grains (Phetchaburi 1 brown rice) cultivated in Phetchaburi Thailand were washed in tap water and drained. The grains were soaked in cold clean tap water in the ratio of 1:3 (grain to water) for 6 hrs. After soaking, the grains were placed on moist filter paper in covered glass dishes and kept at room temperature in the dark for 24 hrs. GBR was dried with a tray dryer at 50^{o}C until moisture content was less than 13%. The grains were milled (wet-milling process) into flour, sieved (70 mesh screen) and packaged in labeled air-tight polythene bag for use.

Cookie preparation

The wheat flours were blended with GBR at ratios of 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100 (wheat flour to GBR flour). The basic ingredients used were 240 g of flour blend, 20 g vegetable shortening, 180 g of butter, 120 g of granulated cane sugar, 90 g of egg, 3 g of salt, and 3 g of yeast powder. Cookies prepared with 100% wheat flour defined as the control. Cookie was prepared by mixing shortening, butter and granulated cane sugar by mixer (LNK 530, Kluay Num Thai Co., Ltd, Thailand), followed by the addition of egg, salt, yeast powder. The flour was added to the batter and

mixed to a homogenous mass. Cookies were shaped by hand into flattened balls and baked in a baking oven for 18 min at 170ºC. The prepared cookies were cooled at room temperature (30±2°C) and packed in sealed polypropylene plastic bags for further quality evaluation. The physical properties including color and texture were determined. The color values of the samples were measured by Colorimetric Spectrophotometer (Hunter Lab, ColorFlex). The texture profile (hardness and crispness) was performed by using a TA-XT plus Texture Analyzer (Ltd in Godalming, Surrey UK). The test speed was set at 0.5 mm/sec with 50% deformation using a 2mm diameter cylinder stainless probe. Sensory properties of cookies were tested on the basis of color, flavour, taste, texture and overall preferences with 5-point hedonic rating scales by 30 untrained panelists.

Chemical analysis

The moisture, protein, fat and ash content of cookies were determined using AOAC (2012) method. Total carbohydrate, Total calories and calories from fat were obtained by calculation using AOAC (2005).

Consumer evaluation

The selected cookies were compared with commercial cookies sold at Namphet shop in Phetchaburi market by conducting the sensory acceptance/ preference in terms of color, taste, flavor, texture and overall liking score with 5-point hedonic scale using 100 consumers in Phetchaburi province.

Statistical analysis

Three replications of each experiment were performed. All data were analyzed and tested by one-way analysis of variance. Significant difference ($p \leq 0.05$) among various treatments was detected by using Duncan's multiple range tests.

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of germinated brown rice flour on quality of cookies

The colors and physical characteristic of cookies substituted of wheat flour with GBR flour are shown in Figure 1 and Table 1, respectively. The results indicated that increasing GBR flour in cookies resulted in decreasing L* value. L* is the luminosity, a* is the position on the green (-) to red (+) axis, and b* is the position on the blue (-) to yellow (+) axis (Girelli *et al*., 2004). The L* and b* value of cookies at 25%, 75% and 100% GRB flour were similar to cookies at 0% GRB flour (control). The a* values of cookies substituted of wheat flour with GBR flour were not different ($p>0.05$). For cookies at 50% GRB flour, the b*

value was significantly higher than others ($p \leq 0.05$). For texture qualities of cookies, increasing GBR flour in cookies resulted in decreasing hardness and crispness. Hardness is important when discussing food texture, which the lower hardness value indicates a softer texture of the product (Jangchud *et al*., 2004). Crispness is related to the ease of fracture or factorability brittleness of a structure (Tunick*, et al*., 2013). The hardness of the cookies varied from 0.45 to 0.10 N and the crispness varied from 58.90 to 29.38 N. The hardness value of cookies at 25% was similar to control ($p > 0.05$) but significantly higher than others ($p \leq 0.05$), while the crispness value of cookies at 25% GRB flour was significantly lower than control ($p \leq 0.05$) but significantly higher than others ($p \leq 0.05$). The hardness and crispiness decrease when increase %GRB might be due to cracks formed with the addition of gluten free GBR (Islam *et al*., 2012). Quintero-Fuentes *et al*. (1999) studied the effects of rice flours on the texture of baked corn and tortilla chips and found that waxy rice changed the texture of baked chips which reduced peak force and work, produced more friable, breakable baked corn and tortilla chips.

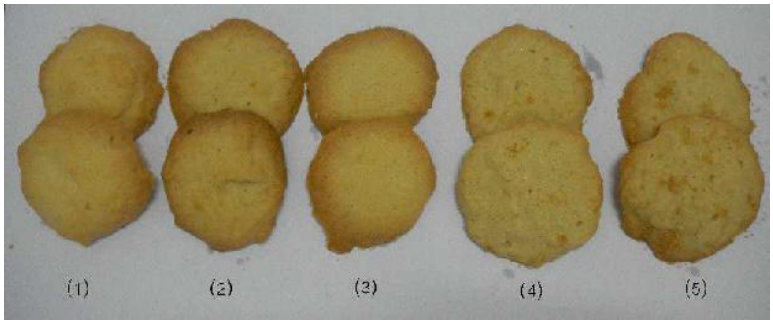


Figure 1 Cookies at difference substitution wheat flour with GBR flour.
(1) = cookies at 0% GRB flour (control), (2) = cookies at 25% GRB flour,
(3) = cookies at 50% GRB flour, (4) = cookies at 75% GRB flour,
(5) = cookies at 100% GRB flour

Table 1 Physical characteristic of cookies at difference of substituted wheat flour with GBR flour

GBR flour substitution (%)	Color value			Texture	
	L*	a*	b*	Hardness (kg/mm^2)	Crispness (N.sec)
0 (control)	71.60 ± 0.53^{ab}	0.73 ± 0.51^{a}	25.43 ± 0.67^{b}	0.45 ± 0.023^{a}	58.90 ± 1.80^{a}
25	70.33 ± 1.48^{b}	0.73 ± 0.29^{a}	24.47 ± 0.67^{b}	0.44 ± 0.015^{a}	46.64 ± 1.22^{b}
50	73.20 ± 0.36^{a}	1.13 ± 0.25^{a}	27.53 ± 0.95^{a}	0.24 ± 0.012^{b}	34.71 ± 1.06^{c}
75	70.07 ± 1.40^{b}	1.40 ± 0.82^{a}	25.67 ± 0.12^{b}	0.17 ± 0.023^{c}	31.57 ± 1.07^{d}
100	69.63 ± 1.36^{b}	1.30 ± 0.87^{a}	25.73 ± 1.01^{b}	0.10 ± 0.013^{d}	29.38 ± 0.23^{e}

Means in rows followed by different letter superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$).

The sensory score for colour, flavour, taste, texture and overall preferences of cookies are shown in Table 2. Colour, flavour and overall preferences of cookies at 25% GRB flour were no significantly difference compare with control ($p>0.05$) but significantly higher than others ($p\leq0.05$). Control recorded the highest overall performance score compared to the other samples. In this study, the optimal wheat flour to GBR ratio was 75:25. This result was similar to Islam *et al*. (2012), Norhidayah *et al*. (2014) and Hossain *et al*. (2014). Islam *et al*. (2012) studied the quality and acceptability of biscuits prepared with the incorporation of brown rice flour in to the various proportions of wheat flour and found that control biscuits (0% brown rice flour) secured the highest score for color, flavor, texture and overall acceptability, which is followed by biscuits containing 5, 10, 15 and 20% brown rice flour. Norhidayah *et al*. (2014) studied the textural and sensorial properties of the cookies prepared by partial substitution of wheat flour with two types of unripe banana flour and found that the substitution of 25% of Tanduk banana flour showed the highest mean score in overall acceptability compared to all treated samples. Hossain *et al*. (2014) reported that bread supplemented with jackfruit seed flour at a ratio of 75:25 (wheat flour to jackfruit seed flour) was most acceptable in terms of nutritional value and overall acceptability compared to the control and other samples.

Table 2 Sensory attributes of cookies at difference of substituted wheat flour with GBR flour

GBR flour substitution (%)	Sensory attributes				
	Color	Taste	Flavor	Texture	Overall acceptance
0 (control)	4.43±0.51^{a}	4.63±0.56^{a}	4.50±0.57^{a}	4.63±0.56^{a}	4.57±0.57^{a}
25	4.47±0.51^{a}	4.17±0.70^{b}	4.23±0.57^{a}	4.33±0.48^{b}	4.30±0.53^{a}
50	4.07±0.41^{b}	3.33±0.61^{c}	3.70±0.67^{b}	3.43±0.57^{c}	3.57±0.68^{b}
75	3.93±0.45^{b}	3.31±0.43^{c}	3.17±0.63^{b}	3.20±0.41^{c}	3.37±0.61^{b}
100	3.37±0.87^{c}	2.20±0.71^{d}	2.27±0.89^{c}	2.07±0.74^{d}	2.13±0.73^{c}

Means in rows followed by different letter superscripts are significantly different ($p\leq0.05$).

Nutrient contents in terms of moisture, protein, fat, ash, and carbohydrate of cookies and cookies at 25% GRB flour are shown in Table 3. The proximate values like moisture, ash and total calories of cookies at 25% GBR flour were higher than cookie (control). Islam *et al*. (2012) reported that the addition of increasing level of brown rice flour (biscuits containing 5, 10 and 15% brown rice flour) had higher ash, fat, moisture and crude fiber contents, while protein and total carbohydrate contents found lower in the biscuits. It has been reported that the increased amount of fiber by,

which might result in the increased moisture retention in the cookies (Chung *et al*., 2014; Ganorkar and Jain, 2014). Chung *et al*., (2014) report that all cookies containing any of the rice flours tested (white, brown, GBR, or heat-moisture treated GBR) contained the higher moisture contents than the control cookies prepared with wheat flour alone the cookies became softer as the level of rice flour increased. They also reported the decrease in hardness with rice flour substitution in cookies could be attributed to the changes in gluten content and moisture content, which gluten were the major reason for the increases in softness by increasing the rice flour substitution because the reduction of gluten in cookie dough by substituting with rice flour resulted in retarding the formation of gluten matrices contributed to the substantial decrease in hardness. Ganorkar and Jain (2014) observed that moisture content of roasted flaxseed flour cookies increased as compared with control cookies, which was attributed to fiber present in flaxseed which has higher moisture retention property. They also reported the increased level of roasted flaxseed flour (more than 15%) in cookies resulted gradually decreased the hardness and fracturability.

Table 3 Nutritive value of cookie (control) and cookies at 25% GBR flour

Nutritive value	cookie (control)	cookies at 25% GBR flour
Moisture, %	2.33	3.08
Protein, %	6.38	5.91
Fat, %	31.22	30.65
Ash, %	1.54	1.62
Total carbohydrate, %	58.53	58.74
(by difference; include crude fiber)		
Total calories, Kcal/100 g	540.62	543.45
Calories from fat, Kcal/100 g	280.98	275.85

Consumer acceptance of cookies replacing wheat flour with germinated brown rice flour

The most of consumers were female, age lower than 21 year old, education level mostly were high school degree, marriage status mostly were single, income level mostly were lower than 5,001 bath per month. The sensory score for color, flavor, taste, texture and overall preferences of cookies at 25% GRB flour compared to commercial cookies are shown in Table 4. The color, taste, flavor, texture and overall liking of cookies at 25% GRB flour were significantly higher than commercial cookies ($p \leq 0.05$). Ninety-nine percent of tested consumer accepted and would buy germinated brown rice cookie.

Table 4 Sensory attributes of cookies at 25% GBR flour and commercial cookie

	Sensory attributes				
	Color	Taste	Flavor	Texture	Overall acceptance
cookies at 25% GRB flour	4.42±0.65[a]	4.48±0.67[a]	4.46±0.64[a]	4.52±0.66[a]	4.54±0.54[a]
commercial cookies	3.43±0.67[b]	3.04±0.64[b]	2.92±0.63[b]	2.76±0.54[b]	2.88±0.46[b]

Means in rows followed by different letter superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$).

CONCLUSION

The obtained results indicated that it is possible to used GBR flour from local brown rice grains (Phetchaburi 1 brown rice) flour to partially substituted wheat flour and germination could add more value to Phetchaburi 1 brown rice. The substitution of 25% GBR resulted in cookies with a good overall acceptability compare to commercial cookies. The nutritious product is beneficial to general customers as well as those who are health-conscious.

REFFERENCES

AOAC, 2005, **Official Methods of Analysis**, 18th ed. Association of Official Chemists International. Gaithersburg, Maryland.

AOAC, 2012, **Official Methods of Analysis**, 19th ed. Association of Official Chemists International. Gaithersburg, Maryland.

Chung, H.J., A. Cho, and S.T. Lim. 2014 .Utilization of germinated and heat-moisture treated brown rices in sugar-snap cookies. **LWT**. 57: 260-266.

Girelli, A. M., Mattei, E., Messina, A. and A. M. Tarola. 2004. Inhibition of polyphenol oxidases activity by various dipeptides. **J. Agric. Food Chem.** 52: 2741-2745.

Ganorkar, P. M. and R.K. Jain. 2014. Effect of flaxseed incorporation on physical, sensorial, textural and chemical attributes of cookies. **Int Food Res J**. 21(4): 1515-1521.

Hossain, M.T., M.M. Hossain, M. Sarker, A. N. Shuvo, M.M. Alam, M.S. Rahman. 2014. Development and quality evaluation of bread supplemented with jackfruit seed flour. **Int J Food Sci Nutr**. 3(5): 484-487.

Islam, M.Z., M.L.J. Taneya, M. Shams-Ud-Din, M. Syduzzaman, and M.M. Hoque. 2012. Physicochemical and functional properties of brown rice (*Oryza sativa*) and wheat (*Triticum aestivum*) flour and quality of composite biscuit made thereof. **The Agriculturists**. 10(2): 20-28.

Jangchud, K., M. Boonthrapong, and W. Prinyawiwatkul. 2004. Effects of Composite Rice Flour and Water Content on Qualities of Thai Rice Cake. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**. 38 : 247 – 254.

Kaosa-ard, T. and S. Songsermpong. 2012. Influence of germination time on the GABA content and physical properties of germinated brown rice. **As. J. Food Ag-Ind**. 5(04), 270-283.

Karladeea, D. and S. Suriyong. 2012. γ-Aminobutyric acid (GABA) content in different varieties of brown rice during germination. SCIENCEASIA. 38 (2012): 13–17.

Madukwe, E. U., I.C. Obizoba, and O.F. Chukwuka. 2013. Nutrient assessment of processed rice (*Oryza sativa*), Soybean (*Glycine max*Merr) flours/ groundnut (*Arachis hypogea*) paste and sensory attributes of their composites. IJSRES. 3(8), 1-8.

Nokkoull, R. and T. Wichitparp. 2013. Quality of upland rice seed produced during the rainy season in southern Thailand. **Int. J. Pl.An and Env.Sci**. 3(3); 181-184.

Norhidayah, M., A. Noorlaila, and A. Izzati. 2014. Textural and sensorial properties of cookies prepared by partial substitution of wheat flour with unripe banana (*Musa* x *paradisiaca var. Tanduk* and *Musa acuminata var. Emas*) flour. **Int. Food Res. J.** 21(6): 2133-2139.

Pitiwiwattanakul, V., S. Phimphilai, S. Nuglor, and C. Chiyasut. 2011. Effects of germinating conditions on antioxidant properties, total polyphenol and phytate contents in quick-cooking husked *Hom Dam* Sukhothai 2 rice. **As. J. Food Ag-Ind**. 4(05), 297-305.

Quintero-Fuentes, X. C., M. McDonough, L. W. Rooney, and H. Almeida-Dominguez. 1999. Functionality of rice and sorghum flours in baked tortilla and corn chips. **Cereal Chem**. 76(5): 705–710.

Tunick, M.H., C.I. Onwulata, A.E. Thomas, J.G. Phillips, S. Mukhopadhyay, S. Sheen, C. Liu, N. Latona, M.R. Pimentel, and P.H. Cooke. 2013. Critical evalution of crispy and crunchy textures: a review. **Int J Food Prop**. 16: 949 - 963.

Wanyo, P., C. Chomnawang, and S. Siriamornpun. 2009. Substitution of wheat flour with rice flour and rice bran in flake products: effects on chemical, physical and antioxidant properties. **World Appl Sci J.** 7 (1): 49-56.

ผลของการให้ความร้อนด้วยเทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อคุณภาพของรำข้าว

Effect of Ultra Superheated Steam Technology on Quality of Rice Bran

สุธาสินี บุญมาวัตร[1] และวรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ[1*]

Suthasinee Boonmawat[1] and Wannasawat Ratphitagsanti[1*]

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากรำข้าวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากรำข้าวมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น โปรตีน ใยอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุ อย่างไรก็ตามรำข้าวเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพและเกิดการหมักได้ง่าย ดังนั้นการศึกษาวิธีการทำให้รำข้าวคงตัวเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น งานวิจัยนี้ศึกษาผลของวิธีการทำให้รำข้าวคงตัวโดยเทคโนโลยีการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งต่อคุณภาพของรำข้าว พบว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 300°C นาน 5 วินาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด มีปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการ โดยมีค่าเท่ากับ 3.57±0.20%, 0.17±0.01, 2.62±1.44% และ 1.95±0.04 มิลลิกรัมสมมูลเพอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งอาจจะสามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่เร่งด้วยกิจกรรมของเอนไซม์ไลเพสได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิสูงภายในเวลาอันสั้น ทำให้รักษาคุณภาพของรำข้าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ CODEX ที่เหมาะสมต่อการบริโภคของมนุษย์

ABSTRACT

Recently, the utilization of rice bran has increased dramatically due to its high nutrition such as protein, dietary fiber, minerals and vitamins. However, rice bran quality is easily degraded by lipase enzyme. Therefore, it is necessary to determine stabilization methods for rice bran to keep for longer storage time. The objective of this study was to determine influence of ultra superheated steam technology (USST) as a stabilization method on quality of rice bran. The results showed that superheated steam at 300°C for 5 s was the most effective to stabilizing rice bran. Moisture content, water activity, free fatty acid content and peroxide value were 3.57±0.20%, 0.17±0.01, 2.62±1.44% and 1.95±0.04 mg Eqv/kg oil, respectively. Superheated steam could prevent oxidation catalyzed by lipase, depending on temperature and time during heating. Moreover, this stabilizing method possessed high-temperature and short-time, thus maintaining physical and chemical properties of rice bran which suitable for human consumption followed CODEX standards.

Key Words: rice bran, superheated steam, stabilization, peroxide value, free fatty acid

*Corresponding author; e-mail address: **wannasawat.r@ku.ac.th**

[1]ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

คำนำ

รำข้าว เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสีข้าว ยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการสูง แต่เกิดการเสื่อมเสียจากการหืนได้อย่างรวดเร็วจากกิจกรรมของเอนไซม์ ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการบริโภคของมนุษย์ จึงนิยมนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ ข้อจำกัดของการใช้รำข้าวคืออายุการเก็บสั้น เนื่องจากมีปริมาณไขมันสูง (12-23%) ทำให้เกิดการหืนจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ไลเพสและไลพอกซีจีเนส โดยเอนไซม์ไลเพสจะไฮโดรไลซ์ไตรกลีเซอไรด์ ได้กรดไขมันอิสระ การสลายตัวของไขมันส่งผลให้เกิดการหืน อัตราการเกิดกรดไขมันอิสระเกิดขึ้นสูงประมาณ 5-7% ต่อวัน และมากถึง 70% ต่อเดือน (Malekian *et al*., 2000) ซึ่งปริมาณกรดไขมันอิสระในรำข้าวต้องต่ำกว่า 5% (Tao *et al*., 1993) และค่าเพอร์ออกไซด์ต้องต่ำกว่า 15 มิลลิกรัม/ กิโลกรัม จึงจะอยู่ในเกณฑ์ที่มนุษย์สามารถบริโภคได้ (CODEX STAN 210, 1999)

ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีต่างๆ เพื่อช่วยให้รำข้าวมีอายุการเก็บนานขึ้น และสามารถใช้เป็นส่วนผสมในอาหาร เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เช่น ขนมปัง, คุกกี้, พิซซ่า, เครื่องดื่ม, นมผง เป็นต้น การทำให้รำข้าวคงตัวมีหลายวิธี เช่น การอบแห้ง, การใช้ไมโครเวฟ, การทำแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด, การทำให้คงตัวด้วยวิธีทางเคมี, การให้ความร้อนแบบโอห์มมิก และเทคโนโลยีเอ็กซ์ทรูชัน เป็นต้น การให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นวิธีทางเลือกในการทำให้รำข้าวคงตัว โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไอน้ำเหนืออุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัว โดยไอน้ำอิ่มตัวจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้งได้ การกระจายไอน้ำให้สม่ำเสมอในห้องอบแห้งสามารถใช้พัดลมเป็นอุปกรณ์ช่วย (สักกมน, 2551)

การให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งช่วยลดการเกิดออกซิเดชันในผลิตภัณฑ์ได้ เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน และการเสื่อมสลายแบบต่างๆ เนื่องจากออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแห้ง มีรูพรุนมาก มีค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) ต่ำ ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำ (water adsorption) ดีขึ้น และมีเนื้อสัมผัสที่กรอบ นอกจากนี้ยังพบว่าการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งสามารถลดการเกิดออกซิเดชันและลดค่าเพอร์ออกไซด์ทั้งก่อนและหลังการเก็บรักษา

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะการให้ความร้อนด้วยเทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่ง และผลของวิธีการทำให้รำข้าวคงตัวต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของรำข้าว

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบ และการเตรียมวัตถุดิบ

รำข้าวพันธุ์ชัยนาท ได้จากกระบวนการสีข้าวที่เก็บรักษาข้าวเปลือกไว้นาน 18 เดือน รำข้าวถูกร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 30 เมช เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอม (ดัดแปลงจาก Bhatnagar *et al*., 2014) จากนั้นบรรจุรำข้าวจำนวน 250 กรัม ลงในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °C ในที่มืดจนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ รำข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการใช้เป็นตัวอย่างควบคุม

2. สภาวะของการให้ความร้อนด้วยเทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ ที่ทำให้รำข้าวคงตัว

ศึกษาสภาวะการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 300°C และ 400°C เป็นเวลา 0, 1, 3, 5, 6, 7 และ 8 วินาที นำรำข้าวที่ผ่านกระบวนการมาวิเคราะห์ค่าสี, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้, ความชื้น, ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์ จากนั้นเลือกสภาวะที่ทำให้รำข้าวมีความชื้น, ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์-

ออกไซด์ต่ำกว่า 4%, 5% และ 15 มิลลิกรัมสมมูลเพอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ (Tao *et al*., 1993; CODEX STAN 210, 1999; Malekian *et al*., 2000) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการให้ความร้อนด้วยเทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับวิธีที่ทำให้รำข้าวคงตัววิธีอื่นๆ ได้แก่

1) การใช้ความร้อนแห้ง (dry heating) นำรำข้าวแผ่ในตะแกรงให้บาง แล้วนำไปอบด้วยลมร้อนในตู้อบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 4% (Kim *et al*., 2014)

2) การใช้ความร้อนชื้นด้วยหม้อนึ่งความดัน ให้ความร้อนรำข้าวที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 นาที ที่ความดัน 15 psi จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ดัดแปลงจาก Kim *et al*., 2014)

หลังจากรำข้าวผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยวิธีต่างๆ แล้ว นำรำข้าวมาพักให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที บรรจุแบบสุญญากาศในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C ในที่มืด เพื่อตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีต่อไป

3. การตรวจสอบคุณภาพของรำข้าว

3.1 การตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพ

วัดค่าสีโดยใช้เครื่อง spectrophotometer (Model CM-3500d; Minolta; Japan) ที่แหล่งกำเนิดแสง D65/10° รายงานค่าสีในระบบ CIE แสดงค่า L* (ค่าความสว่าง), a* (ค่าความเป็นสีแดง) b* (ค่าความเป็นสีเหลือง) และ $\triangle$E* (ค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด) โดยค่า $\triangle$E* คำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2}$$

4.2 การตรวจสอบคุณภาพทางเคมี

หาปริมาณความชื้น โดยน้ำหนักแห้ง ตามวิธี AOAC (2000)

สำหรับการสกัดน้ำมัน นำรำข้าวผสมกับเฮกเซนในอัตราส่วน 1:6 โดยใช้เครื่องกวนผสม (Stuart scientific, ss3, UK) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำส่วนผสมไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ จากนั้นนำสิ่งที่กรองได้ไปผสมเฮกเซนปริมาณ 120 มิลลิลิตร เพื่อทำการกรองอีกครั้ง จากนั้นนำส่วนผสมไประเหยด้วยเครื่อง rotary evaporator (Buchi, R-III, Switzerland) ภายใต้ความดัน และอุณหภูมิ 40°C นำน้ำมันรำข้าวที่สกัดได้ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C ในที่มืด เพื่อนำไปตรวจสอบปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์ (ดัดแปลงจาก Kim *et al*., 2014)

การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ ตามวิธี AOCS (1997)

การหาค่าเพอร์ออกไซด์ ตามวิธี AOCS (1997)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูล โดยการทดสอบแบบ One – way Analysis of Variance (ANOVA) ใช้โปรแกรม SPSS 12.0 (version 12.0; SPSS Inc, Chicago, IL, USA) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 และทดสอบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's multiple-range test

ผลและวิจารณ์การทดลอง

1. สภาวะของการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

รำข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 400°C มีผลทำให้รำข้าวเกิดการไหม้ มีสีน้ำตาลเข้ม (ไม่ได้แสดงข้อมูล) ส่วนรำข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 300°C ที่ระยะเวลาต่างๆ แสดงใน Table 1 พบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสว่างลดลง แต่ค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ที่เวลา 7 และ 8 วินาที มีค่า $\triangle$ E* เพิ่มสูงขึ้น เมื่อไอน้ำมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวหรืออุณหภูมิจุดเดือดที่ความดันที่กำหนด เกิดการถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งสู่อาหารและความชื้นในอาหารจะออกสู่ภายนอกในระหว่างการทำแห้ง (Karimi, 2010) เมื่อระยะเวลาในการให้ความร้อนนานขึ้น ปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 5 วินาทีแรก เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อน สำหรับค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้มีแนวโน้มลดลงในช่วง 3 วินาทีแรก

Table 1 Effect of superheated steam on color values, moisture content and water activity of rice bran

time (s)	Color values			$\triangle$ E*	Water activity	Moisture content (%)
	L*	a*	b*			
0	73.63±0.03^{a}	2.44±0.01^{f}	16.35±0.05^{f}	-	0.57±0.00^{a}	10.96±0.45^{a}
1	66.92±0.04^{b}	5.38±0.03^{e}	22.46±0.06^{e}	3.21±0.02^{e}	0.31±0.00^{b}	10.77±0.41^{a}
3	66.72±0.00^{c}	5.44±0.01^{d}	22.65±0.05^{d}	3.48±0.02^{d}	0.28±0.01^{c}	6.50±0.54^{b}
5	65.84±0.01^{e}	5.65± 0.08^{c}	22.82±0.18^{c}	4.35±0.06^{c}	0.17±0.01^{d}	3.57±0.20^{c}
6	65.90±0.02^{d}	5.69±0.03^{c}	22.89±0.07^{c}	4.34±0.01^{c}	0.16±0.00^{de}	3.06±0.06^{c}
7	61.26±0.02^{f}	8.00±0.07^{b}	25.07±0.09^{a}	9.91±0.03^{b}	0.15±0.01^{ef}	2.68±0.02^{c}
8	58.50±0.04^{g}	8.18±0.05^{a}	23.72±0.04^{b}	11.96±0.03^{a}	0.14±0.00^{f}	2.56±0.08^{c}

$^{a-g}$ Means within column with different superscripts were significantly different at $P<0.05$

$\triangle$ E* is the total color differences

เกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการบริโภคของมนุษย์ กำหนดให้รำข้าวมีปริมาณความชื้น, ปริมาณกรดไขมันอิสระและค่าเพอร์ออกไซด์ต่ำกว่า 4%, 5% และ 15 มิลลิกรัมสมมูลเพอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ จึงสามารถลดการเกิดออกซิเดชันในระหว่างการเก็บรักษาได้ (Tao *et al*., 1993; CODEX STAN 210, 1999; Malekian *et al*., 2000) การให้ความร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 300°C ที่ระยะเวลา 5, 6, 7 และ 8 วินาที ส่งผลให้ปริมาณความชื้น, ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์ อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของจันทร์สม (2546) ได้รายงานว่ารำข้าวที่ผ่านการคงสภาพด้วยความร้อนจากไมโครเวฟมีความชื้นต่ำกว่า 5% สามารถทำลายกิจกรรมเอนไซม์ได้ดี และยังทำให้กรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นน้อยมาก หลังจากเก็บรักษา

นาน 2 สัปดาห์ ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการให้ความร้อนด้วยเทคโนโลยีไอน้ำร้อนยวดยิ่งคือสภาวะที่อุณหภูมิ 300°C นาน 5 วินาที เป็นสภาวะที่ใช้ระยะเวลาน้อยที่สุด ยังคงรักษาคุณภาพของรำข้าว โดยมีปริมาณความชื้น, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้, ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์เท่ากับ 3.57±0.20%, 0.17±0.01, 2.62±1.44% และ 1.95±0.04 มิลลิกรัมสมมูลเพอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 1

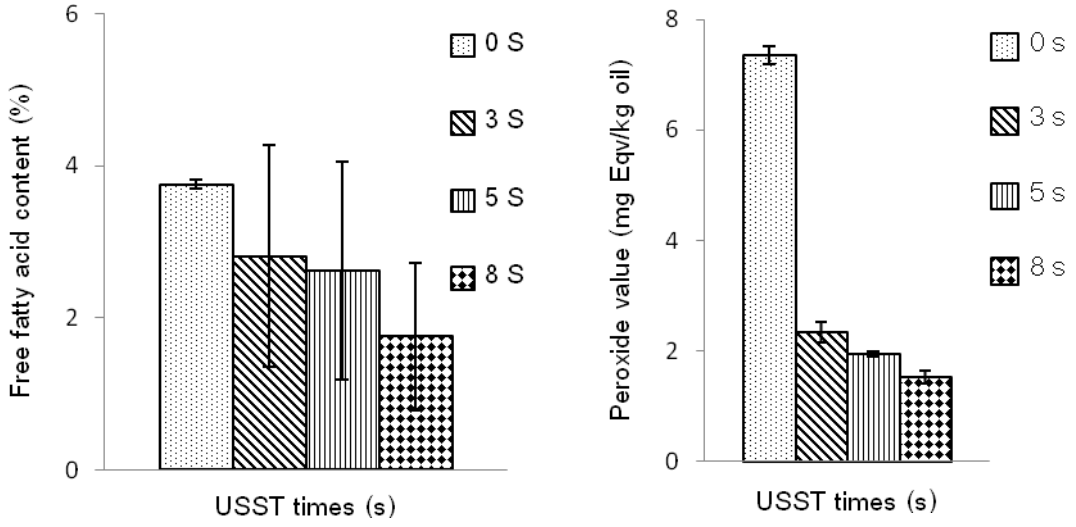


Figure 1 Effect of superheated steam treatment times on free fatty acid content and peroxide value at 300°C

2. ประสิทธิภาพของการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ ที่ทำให้รำข้าวคงตัว

วิธีการทำให้รำข้าวคงตัวมีผลต่อค่าสีอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ดังแสดงใน Table 2 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม พบว่ารำข้าวที่ทำให้คงตัวด้วยวิธีต่างๆ มีค่าความสว่างลดลง แต่ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด โดยเกิดขึ้นเมื่อวัตถุดิบอยู่ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้น ออกซิเจน และโลหะ จึงทำให้องค์ประกอบในรำข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลง การสลายตัว และเกิดปฏิกิริยาหลายขั้นตอน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล (จันทร์สม, 2546) การทำให้รำข้าวคงตัวด้วยวิธีหม้อนึ่งความดันมีผลทำให้ค่า $\triangle E^*$ สูงที่สุดเท่ากับ 7.23±0.03 และวิธีอบแห้งมีผลทำให้ค่า $\triangle E^*$ น้อยที่สุดเท่ากับ 1.17±0.05 ทุกวิธีที่ทำให้รำข้าวคงตัวนั้นมีผลทำให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้และปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านกระบวนใดๆ

Table 2 Color values, water activity and moisture content of rice bran treated by different stabilizing methods

Stabilizing methods	Color values			△ E*	Water activity	Moisture content (%)
	L*	a*	b*			
Untreated	73.63±0.03[a]	2.44±0.01[d]	16.35±0.05[d]	-	0.57±0.00[a]	10.96±0.45[a]
Dry heating	68.75±0.04[b]	4.95±0.03[c]	21.28±0.08[c]	1.17±0.05[c]	0.13±0.00[d]	2.63±0.10[c]
Autoclave with dry heating	64.40±0.02[d]	6.89±0.02[a]	25.39±0.05[a]	7.23±0.03[a]	0.23±0.01[b]	2.04±0.08[c]
Superheated steam at 300°c 5 s	66.28±0.20[c]	5.54±0.05[b]	22.73±0.06[b]	3.48±0.02[b]	0.17±0.00[c]	3.57±0.20[b]

[a-d] Means within column with different superscripts were significantly different at P<0.05

△ E* is the total color differences

ปริมาณกรดไขมันอิสระและค่าเพอร์ออกไซด์เกี่ยวข้องกับกิจกรรมของเอนไซม์ไลเพส Figure 2 แสดงผลของวิธีการทำให้รำข้าวคงตัวต่อปริมาณกรดไขมันอิสระและค่าเพอร์ออกไซด์ โดยปริมาณกรดไขมันอิสระและค่าเพอร์ออกไซด์ในตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากรำข้าวมีปริมาณความชื้นสูง (10.96±0.45%) ความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในรำข้าว อีกทั้งตัวอย่างรำข้าวไม่ได้ผ่านการให้ความร้อน จึงยังคงมีกิจกรรมของเอนไซม์ไลเพส เมื่อเอนไซม์ไลเพสทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น (จันทร์สม, 2546) ส่วนวิธีการอบแห้ง การใช้หม้อนึ่งความดัน และการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีผลยับยั้งปริมาณกรดไขมันอิสระและค่าเพอร์ออกไซด์ การใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในรำข้าวมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการ สามารถบ่งชี้การยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไขมันได้ และอาจส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมต่อการทำให้รำข้าวคงตัวคือวิธีการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เนื่องจากมีค่าสีเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ต่ำ ปริมาณความชื้น ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และที่สำคัญใช้เวลาในกระบวนการน้อยที่สุด สามารถรักษาคุณภาพของรำข้าวไว้ได้ดี ประหยัดพลังงาน และยังยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ที่ก่อให้เกิดการออกซิเดชันของไขมันอีกด้วย

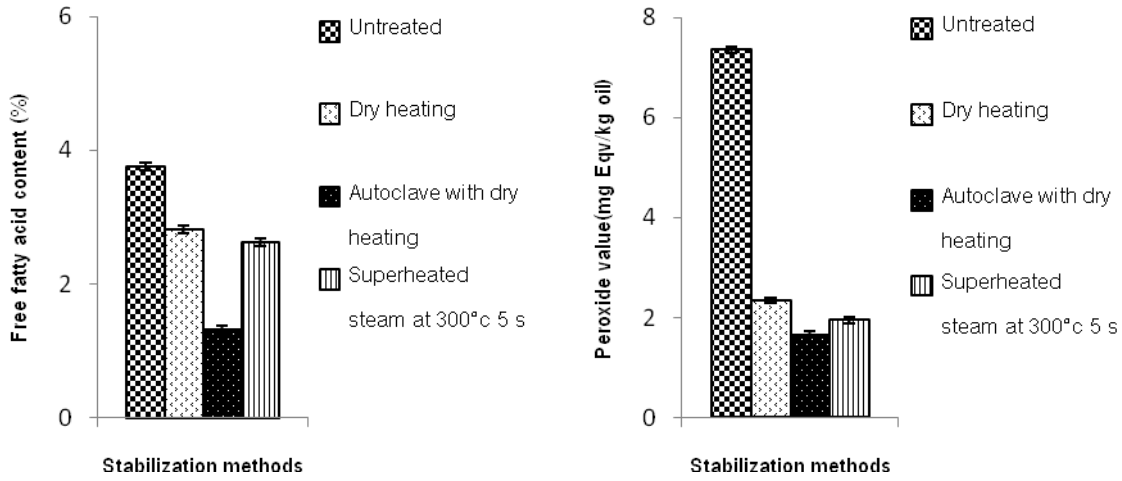


Figure 2 Effect of stabilization method on free fatty acid content and peroxide value of treated rice bran

สรุป

รำข้าว เกิดการออกซิเดชันด้วยเอนไซม์อย่างรวดเร็ว ทำให้มีอายุการเก็บรักษาสั้น ผลจากการวิจัยนี้แสดงถึงการเปรียบเทียบวิธีการทำให้รำข้าวคงตัวด้วยวิธีหม้อนึ่งความดัน การอบแห้ง และการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีผลยับยั้งปริมาณกรดไขมันอิสระ ค่าเพอร์ออกไซด์ และลดปริมาณความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์สำหรับการบริโภคของมนุษย์ โดยวิธีการที่ทำให้รำข้าวคงตัวที่เหมาะสมคือการให้ความร้อนด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะ 300°C นาน 5 วินาที เป็นสภาวะที่ใช้ระยะเวลาน้อยที่สุด โดยยังคงรักษาคุณภาพของรำข้าว มีปริมาณความชื้น, ค่าวอเตอร์-แอคทิวิตี้, ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์เท่ากับ 3.57±0.20%, 0.17±0.01, 2.62±1.44% และ 1.95±0.04 มิลลิกรัมสมมูลเพอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ กรดไขมันอิสระมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในระหว่างการเก็บรักษา การใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิสูง ภายในเวลาสั้น ส่งผลให้สามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ไลเพส และยังรักษาคุณภาพทางกายภาพและคุณสมบติทางเคมีของรำข้าวให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน CODEX ที่เหมาะสมกับการนำไปเป็นส่วนประกอบของอาหารชนิดต่างๆ ต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ประจำปีงบประมาณ 2557 และบริษัท JSP Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น สำหรับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องผลิตไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ultra superheated steam equipment)

เอกสารอ้างอิง

จันทร์สม แก้วอุดร. 2546. **การทำให้รำข้าวมีความคงตัวด้วยไมโครเวฟ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2551. **การอบแห้งอาหารด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะความดันต่ำ**. แหล่งที่มา: http://www.vcharkarn.com/varticle/38207, 12 พฤศจิกายน 2558.

Association of Official Analytical Chemists. 2000. **Official Methods of Analysis**. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, USA.

American Oil Chemists' Society. 1997. **Official Methods and Recommened Practices of the AOCS**. 5th ed. The American Oil Chemists' Society Champaign, Illinois.

Bhatnagar, A.S., D.S. Prabhakar, P.K. P. Kumar, R.G. R. Rajan and A.G.G. Krishna. 2014. Processing of commercial rice bran for the production of fat and nutraceutical rich rice brokens, rice germ and pure bran. **LWT-Food Science and Technology** 58: 306-311.

CODEX STAN 210. 1999. **CODEX standard for named vegetable oils.**

Karimi, F. 2010. Applications of superheated steam for the drying of food products. **International Agrophysics.** 24: 195-204.

Kim, S.M., H.J. Chung and S.T. Lim. 2014. Effect of various heat treatments on rancidity and some bioactive compounds of rice bran. **Journal of Cereal Science** 60: 243-248.

Malekian, F., R.M. Rao, W. Prinyawiwatkul, W. E. Marshall., M. Windhuaser and M. Ahmedna. 2000. Lipase and lipoxygenase activity, functionality and nutrient losses in rice bran during storage. Bulletin. No. 870. pp 65.

Tao, J., R. Rao and J. Liuzzo. 1993. Microwave-heating for rice bran stabilization. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy** 28: 156-164.

สมบัติกายภาพของเส้นใยผักตบชวา สำหรับการปั่นเส้นด้าย O.E. ผสมเส้นใยผักตบชวาและฝ้าย

Physical properties of water hyacinth fiber for O.E. spinning water hyacinth/cotton fiber blended yarn

จิรชยา บุญญฤทธิ์[1] วุฒินันท์ คงทัด[1] สุธีรา วิทยากาญจน์[1] ชนาพร งามโรจน์[1] และ **รังสิมา ชลคุป**[1*]

Jirachaya Boonyarit[1], Wuttinant Kongtud[1], Suteera Witayakran[1], Chanaporn Ngamroj[1] and Rungsima Chollakup[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาองค์ประกอบของลำต้นและเส้นใยผักตบชวา เพื่อนำมาศึกษาศักยภาพในการผลิตเส้นด้ายปั่นผสมเส้นใยผักตบชวาและฝ้ายในอัตราส่วน 50/50 ด้วยระบบ Open-End spinning ระดับห้องปฏิบัติการ ผลขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหลังการสกัดด้วยเครื่องขูดเส้นใยพบว่ามีปริมาณเซลลูโลส 53.84% ผลของการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชั่นด้วย FTIR พบว่าที่อายุ 6 เดือน เส้นใยมีปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสต่ำกว่าที่อายุ 4 เดือน ลักษณะสัณฐานของเส้นใยภายใต้กล้อง SEM พบการรวมกันของกลุ่มเส้นใย ส่วนการสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบลักษณะพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยผักตบชวามีรูพรุนที่กว้างและมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม การศึกษาสมบัติทางกายภาพพบว่าขนาดเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอายุที่มากขึ้น และมีค่าความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลง เมื่อนำเส้นใยผักตบชวามาทดลองปั่นด้ายผสมกับเส้นใยฝ้ายในสัดส่วน 50/50 ด้วยระบบ Open End spinning พบว่าเส้นด้ายปั่นผสมมีสมบัติเชิงกลลดลง 35% และมีความไม่สม่ำเสมอ หนา บาง สูงกว่าด้ายฝ้าย 100% มาก แสดงศักยภาพของการนำเส้นด้ายปั่นผสมผักตบชวาในการทำผลิตภัณฑ์เคหะสิ่งทอ และเครื่องประดับตกแต่ง

ABSTRACT

In this study, the compositions of water hyacinth stems and fibers were investigated for potential as laboratory production of water hyacinth/cotton fiber blended yarn at 50/50 in Open-End (OE) spinning. Cellulose content of water hyacinth fibers after extraction using decorticated machine was 53.84%. FTIR spectrum of water hyacinth fibers at 6 months showed low intensity peak of cellulose and hemicellulose compared to ones at 4 months. Fiber morphology observed by SEM showed bundle fibers, while fiber morphology observed by microscope showed really wide rumen and multi-angle surface. Physical properties of fiber found that the size of older fiber was larger than the young one. Meanwhile, fiber strength and water retention of 4 month fiber were higher than 6 month fiber. The 50/50 water hyacinth and cotton fibers were blended using OE spinning system for the blended yarn. Tenacity, %elongation and evenness properties of blended yarn decreased when compare with 100% cotton yarn. The potential usage of the water hyacinth/cotton fiber blended yarn was appropriated for home textiles and decorated fabrics.

Key Words: water hyacinth fiber, mechanical property, blended yarn, Open End spinning

*Corresponding author ; email address : **aaprmc@ku.ac.th**

[1] สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1] Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900

คำนำ

ผักตบชวา มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Eichhornia crassipes* ถือเป็นวัชพืชน้ำที่แพร่ขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว มีรายงานพบว่าประเทศไทยมีผักตบชวาในแหล่งน้ำทั่วประเทศประมาณ 6.24 ล้านตัน (ประมวล อุปกิจ, 2557) ถือเป็นปริมาณที่สูงมากพอที่จะนำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการควบคุมการแพร่กระจายของผักตบชวาในแหล่งน้ำ โดยถูกนำมาทำให้น้ำสะอาด ทำอาหารสัตว์ ทำปุ๋ย เพาะเห็ด ทำก๊าซหุงต้ม โดยเฉพาะส่วนของเส้นใยผักตบชวา ที่มีลักษณะเหนียว แข็งแรง เหมาะกับการผลิตเครื่องจักสานต่างๆ ผลิตเป็นกระดาษ ขึ้นรูปเป็นแผ่นผนังบุภายในบ้าน หรือถูกบดให้เป็นผงละเอียด และผสมกับวัสดุต่างๆ เพื่อขึ้นรูปเป็นคอมพอสิทที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันตามความต้องการในการใช้งาน เช่น นำมาผสมกับแผ่นหลังคา (บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตสองสกุล, 2538) เพื่อเสริมความแข็งแรง หรือผสมกับน้ำยางธรรมชาติเพื่อขึ้นรูปเป็นฉนวนกันความร้อน (Jaktorn and Jiajitsawat, 2014) นอกจากนี้ยังมีความสนใจนำเส้นใยผักตบชวามาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยการศึกษาของวีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ (2533) พบว่าเส้นใยผักตบชวามีสมบัติที่มีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และการใช้เส้นใยฝ้ายผสมเส้นใยผักตบชวาที่สัดส่วน 25% ต่อน้ำหนักรวม ก่อให้เกิดด้ายที่มีความแข็งแรงมากที่สุด นอกจากนี้ ยังมีผลงานการนำเส้นใยผักตบชวามาทอร่วมกับเส้นด้ายฝ้ายเพื่อขึ้นรูปเป็นผืนผ้าทอ (สมพร วาสะสิริ, 2558) และทำผลิตภัณฑ์เคหะสิ่งทอ (home textile) ในปี 2555 ได้มีการศึกษาการใช้เส้นใยทั้งลำต้นมาตีเกลียวและเป็นเส้นพุ่งทอเป็นผ้าสำหรับเคหะสิ่งทอ (ชาญชัย สิริเกษมเลิศ, 2556) นอกจากนี้ยังมีการนำเส้นใยผักตบขวาที่เตรียมจากเครื่องขูดเส้นใย มาปั่นผสมกับเส้นใยฝ้าย ปั่นเป็นด้ายระบบปั่นฝ้ายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และนำมาทอเป็นผ้าผืนเพื่อทำผลิตภัณฑ์เสื้อผ้า กระเป๋า รองเท้า ซึ่งเป็นการศึกษาภายใต้โครงการพัฒนาวิชาการเรื่องโครงการพัฒนารูปแบบและการบริหารการจัดการผลิตภัณฑ์ OTOP ประเภทผ้าและเครื่องแต่งกาย พื้นที่ภาคเหนือและภาคกลาง (สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, 2557) ถือได้ว่าเป็นการพัฒนาการผลิตนวัตกรรมสิ่งทอจากเส้นใยผักตบชวาและเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัชพืช รวมทั้งสร้างความแตกต่างให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอจากวัสดุธรรมชาติ

อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบรายงานการศึกษาอิทธิพลของอายุการเก็บเกี่ยวผักตบชวาที่อาจมีผลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใย ซึ่งอาจมีส่วนช่วยให้การคัดเลือกผักตบชวาเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ และก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้น ในการศึกษานี้ จึงสนใจศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยผักตบชวาที่อายุเก็บเกี่ยวต่างกัน เพื่อนำมาศึกษาศักยภาพในการนำเส้นใยผักตบชวามาปั่นผสมกับเส้นใยฝ้ายสำหรับปั่นเป็นเส้นด้ายด้วยระบบ Open-End Spinning (OE spinning) เปรียบเทียบกับเส้นด้ายฝ้าย

อุปกรณ์และวิธีการ

ลำต้นผักตบชวาเก็บจากบริเวณลำคลอง ต.ไม้ตรา อ.บางไทร จ.พระนครศรีอยุธยา ช่วงเดือนพฤษภาคม และเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2558 เป็นช่วงอายุ 4 เดือน และ 6 เดือน ตามลำดับ โดยมีขนาดของลำต้นที่ปลายโคนประมาณ 3-4 เซนติเมตร และ 5-6 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนความยาวจะคัดที่ มากกว่า 60 เซนติเมตร โดยเมื่อตากแห้งพบว่า ลำต้นของอายุ 4 เดือน เป็นสีขาวนวล ส่วนลำต้นของอายุ 6 เดือน จะเป็นสีน้ำตาลอ่อน

การเตรียมวัตถุดิบเส้นใยผักตบชวา

เส้นใยจากลำตันผักตบชวา เตรียมด้วยวิธีการขูดด้วยเครื่องขูดเส้นใย หลังจากนั้นนำมาล้างน้ำสบู่และน้ำสะอาด และหมักนุ่มด้วยน้ำยาปรับนุ่ม 4 กรัมต่อลิตร LR 1:5 แล้วตากแห้งในร่ม แล้วจึงทำการแยกเป็นเส้นใย

เดี่ยวด้วยเครื่องอัดบดเส้นใย (individual breaking machine) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของเส้นใยที่ดีขึ้น นำเส้นใยที่ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ ปริมาณสารแทรก ลิกนิน แอลฟาเซลลูโลส และปริมาณเถ้าตามวิธี Tappi และปริมาณโฮโลเซลลูโลสด้วยวิธี Sodium chlorite (Browning, 1967) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบอยู่บนเส้นใยผักตบชวาด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ด้วย ATR mode ช่วงความยาวคลื่น 4000 - 400 cm^{-1} ทำการ normalization โดยการวัดค่า intensity ของพีคที่ความยาวคลื่น 1060 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณ CO stretching (Kataoka and Kondo, 1998) แล้วนำมาปรับค่า intensity ของพีคทั้งหมดโดยใช้โปรแกรมออมนิก (Omnic program) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความเข้มของพีคที่ต่างกันได้

ศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยผักตบชวา และลักษณะพื้นที่หน้าตัด

ศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยผักตบชวาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (Meiji, Japan) และกล้อง Scanning Electron Microscope: SEM ชนิด (XL Series, XL30, Philips, The Netherland) ที่ 13 KV กำลังขยายตามขนาดที่เหมาะสมของเส้นใย

ศึกษาสมบัติทางเชิงกลและขนาดเส้นใย ของเส้นใยผักตบชวา

นำเส้นใยผักตบชวามาแยกออกเป็นเส้นใยเดี่ยว ที่มีความยาวมากกว่า 60 มิลลิเมตร และยึดเส้นใยที่คัดเลือกแล้วติดกับเฟรมกระดาษ ให้ระยะยึดระหว่างปลายเส้นใยเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และให้เส้นใยมีลักษณะตึงเป็นเส้นตรง ทดสอบค่าความแข็งแรงจำเพาะ (tenacity) การยืดตัว (elongation) ตามวิธีของ ISO 5079 - 1955(E) ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยระยะที่ใช้ทดสอบ (gauge length) เท่ากับ 30 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการดึงเส้นใยผักตบชวาอยู่ที่ 3 มิลลิเมตรต่อนาที จำนวนอย่างน้อย 50 ซ้ำ วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย จำนวนอย่างน้อย 50 ซ้ำ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Meiji, Japan) และวัดค่าความละเอียด (fineness) ตามวิธี ISO 1973

ศึกษาสมบัติการอุ้มน้ำ

นำเส้นใยผักตบชวา มาทดสอบสมบัติการอุ้มน้ำ (water retention value) ตามวิธีของ Razali *et al*. (2015) ด้วยการนำตัวอย่างเส้นใยอบที่อุณหภูมิ 50 ^{o}C นาน 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักเส้นใยหลังอบ (W_d) นำเส้นใยที่ได้แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักเส้นใย ณ ชั่วโมงที่ 3, 6, 9 และ 24 ชั่วโมง ตัวอย่างเส้นใยแต่ละชนิดที่แช่ตามระยะเวลาที่กำหนด จะถูกนำมาซับน้ำที่บริเวณผิวหน้าด้วยกระดาษทิชชู่ แล้วจึงชั่งน้ำหนักของเส้นใยที่อุ้มน้ำเอาไว้ (W_s) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำต่อชนิดเส้นใย คำนวณค่าการอุ้มน้ำ ตามสมการที่ 1

$$\text{Water retention (\%)} = \frac{(Ws - Wd)}{Wd} x100 \quad \text{สมการที่ 1}$$

การปั่นด้ายผสมเส้นใยผักตบชวากับฝ้าย

ตัดเส้นใยผักตบชวาให้มีความยาว 40 มิลลิเมตร เพื่อเตรียมผสมกับเส้นใยฝ้าย โดยมีกระบวนการตามขั้นตอนการปั่นด้ายระบบ Open-End spinning ระดับห้องปฏิบัติการ ด้วยเครื่องสางและเตรียมสไลเวอร์

(USTER MDTA3) และเครื่องปั่น (Quickspin) ที่บริษัทก้องเกียรติ เท็กซ์ไทล์ จำกัด โดยใช้อัตราส่วนของเส้นใยผักตบชวาต่อเส้นใยฝ้ายเท่ากับ 50 : 50 และมีขั้นตอนการปั่นด้ายดังแสดงใน Figure 1.

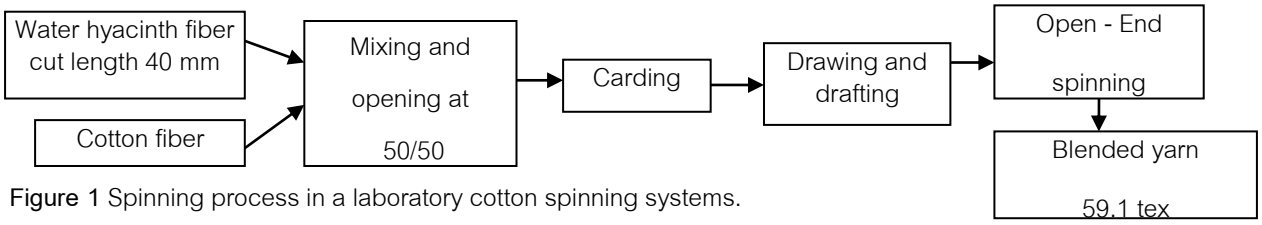


Figure 1 Spinning process in a laboratory cotton spinning systems.

เส้นด้ายที่ได้นำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายที่สำคัญ คือ เบอร์ด้าย (yarn number) ตามวิธี ISO 1260 จำนวนเกลียวต่อนิ้ว (yarn twist) ตามวิธี ISO 2061 ความแข็งแรงจำเพาะ (tenacity) และ %การยืดตัว (%elongation) ตามวิธี ISO 2062 ความสม่ำเสมอ (evenness) และ ลักษณะ imperfection (ASTM D-1425) โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ กับเส้นด้ายฝ้าย 100%

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

องค์ประกอบทางเคมีของลำต้นและเส้นใยผักตบชวา

Table 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของลำต้นผักตบชวาและเส้นใยที่ได้จากส่วนของลำต้นที่อายุ 4 เดือน จะพบว่า ปริมาณสารแทรกที่พบในเส้นใยผักตบชวามีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับลำต้นของผักตบชวา ในขณะที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 53.84% โดยมีปริมาณใกล้เคียงกับรายงานของ Methacanon *et al*. (2010) ที่พบในปริมาณ 52.20% เนื่องจากวิธีการขูดเส้นใยด้วยเครื่องขูดเส้นใย มีการกำจัดเปลือกซึ่งมีปริมาณสารแทรกและสิ่งเจือปนอื่นออกไป และในกระบวนการล้างด้วยสบู่สามารถกำจัดสารเจือปนออกไปได้บ้าง

Table 1 Chemical compositions of water hyacinth stem and water hyacinth fiber.

Chemical compositions	Water hyacinth stem	Water hyacinth fiber
1. Extractive	28.86 ± 0.13[a]	8.55 ± 0.23[b]
2. Lignin	4.19 ± 0.08[a]	3.24 ± 0.04[b]
3. Holo-cellulose	54.98 ± 0.42[b]	76.07 ± 0.01[a]
4. Alpha-cellulose	38.40 ± 0.10[b]	53.84 ± 0.20[a]
5. Hemi-cellulose	16.58 ± 0.32[b]	22.73 ± 0.19[a]
6. Others	19.05 ± 0.11[a]	3.10 ± 0.08[b]

Different letters (a, b) in the same row mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$ by Duncan's Multiple-Range Test.

ผลของ FTIR ของเส้นใยผักตบชวาที่อายุ 4 และ 6 เดือน แสดงใน Figure 2 พบว่า พีคที่ 2923 และ 2854 cm^{-1} เป็นสัญญาณจากการ stretching ของพันธะ C-H ภายในหมู่ CH และ CH_2 ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (Paiva *et al*., 2007) ของเส้นใยผักตบชวาอายุ 4 เดือน มีค่าสูงกว่าเส้นใยที่มีอายุ 6 เดือน ซึ่งปริมาณเซลลูโลสที่มีค่าเพิ่มขึ้นนี้ อาจส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยผักตบชวาที่อายุ 4 เดือน ดังที่ Reddy and Yang

(2005) อธิบายปรากฏการณ์นี้ว่า เมื่อเส้นใยมีปริมาณเซลลูโลสที่มากทำให้ความเป็นผลึกมาก จึงช่วยทำให้เสริมความแข็งแรงของผนังเซลล์ อย่างไรก็ตามพบว่า สมบัติทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติขึ้นกับหลายปัจจัย (Rowell *et al*., 2000) และการวัดสมบัติทางกายภาพขึ้นกับความแก่ตัวของพืช แหล่งของเส้นใย กระบวนการสกัดเส้นใย และสภาวะของพืช (Reddy and Yang, 2005)

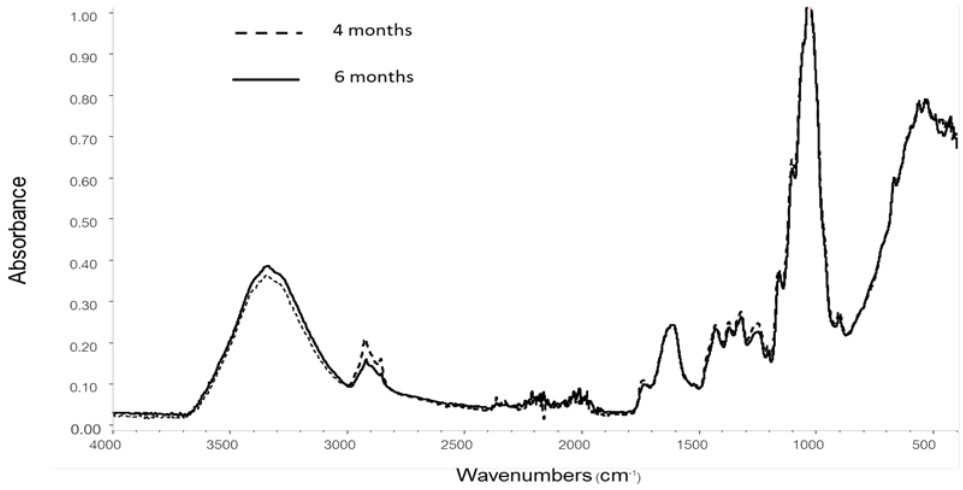


Figure 2 FTIR Spectra of water hyacinth fibers at 4 and 6 months.

ลักษณะสัญฐาน (SEM) ของเส้นใยผักตบชวา

ลักษณะสัณฐานของเส้นใยลำต้นผักตบชวาภายหลังผ่านกระบวนการเตรียมเส้นใย โดยการสังเกตพื้นที่หน้าตัด (Figure 3A) และพื้นผิวตามยาวเส้นใย (Figure 3B) จะมองเห็นการรวมกันของเส้นใยเดี่ยวเป็นกลุ่มเส้นใย Figure 4 แสดงลักษณะของหน้าตัดเส้นใยผักตบชวาผ่านกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งอยู่บริเวณส่วนกลาง จะเห็นว่า เส้นใยผักตบชวามีรูพรุนที่กว้าง และมีรูปร่างเป็นทรงเหลี่ยมที่ชัดเจน ซึ่งน่าจะมีส่วนช่วยในการถ่ายเทอากาศหรือน้ำได้ดี

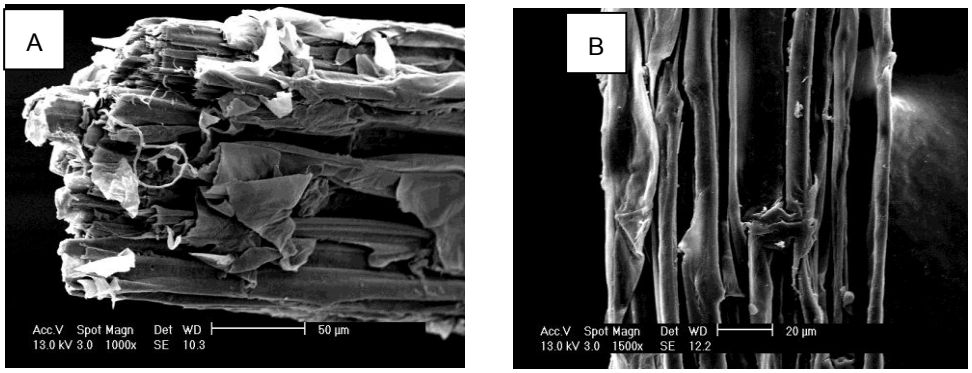


Figure 3 SEM micrographs of cross section (A) and longitudinal view (B) of water hyacinth fiber at 4 months (1000× and 1500x magnification).

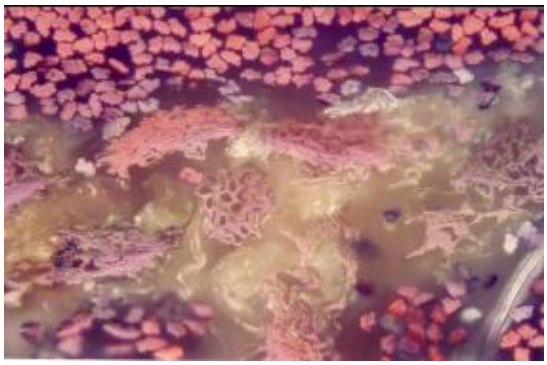


Figure 4 Cross section of water hyacinth fibers at 4 months (investigated under microscope).

สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของเส้นใยผักตบชวา

การทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยผักตบชวา ดังแสดงใน Table 2 พบว่า อายุของผักตบชวามีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล โดยอายุที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นใยผักตบชวามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้น และค่าการยืดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่กลับมีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่า Young's modulus ลดลง ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Razali *et al*. (2015) ที่พบว่าอายุของต้นกระเจี๊ยบที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เส้นใยจากต้นกระเจี๊ยบมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่มีความทนทานต่อแรงดึงที่ต่ำลง ในขณะที่ค่าความละเอียดของเส้นใย (Fiber fineness) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุของเส้นใยเพิ่มขึ้น (แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มีขนาดสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นใยลดลง เมื่ออายุผักตบชวาเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงจำเพาะ (Tenacity) ซึ่งคิดต่อค่าความละเอียดของเส้นใยที่อายุ 6 เดือนมีค่าสูงกว่าที่อายุ 4 เดือน อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาจากค่า Tensile strength ของเส้นใยผักตบชวาที่อายุ 4 เดือน ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า Tensile strength ของเส้นใยผักตบชวาที่อายุ 6 เดือน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$ จึงกล่าวได้ว่าเส้นใยผักตบชวาที่อายุ 4 เดือนมีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยผักตบชวาที่อายุ 6 เดือน

Table 2 Physical and Mechanical properties of water hyacinth fibers at 4 and 6 months.

Properties	Age of water hyacinth fibers	
	4 months	6 months
Fiber fineness (tex)	4.89 ± 0.33^{ns}	4.64 ± 0.74^{ns}
Tenacity (g/tex)	21.19 ± 6.75^{ns}	27.69 ± 9.02^{ns}
Diameter (um)	142.45 ± 34.30^{b}	173.65 ± 50.28^{a}
Tensile Strength (MPa)	75.35 ± 25.24^{a}	43.95 ± 10.46^{b}
% Elongation	4.18 ± 1.36^{ns}	4.98 ± 1.33^{ns}
Young's modulus (GPa)	2.95 ± 1.33^{a}	0.68 ± 0.18^{b}

Different letters (a, b) in the same row mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$ by Duncan's Multiple-Range Test. NS means no significant difference at $p > 0.05$.

สมบัติการอุ้มน้ำของเส้นใยผักตบชวา

Figure 5 แสดงความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใยผักตบชวาที่อายุ 4 เดือน ซึ่งมีความสามารถในการอุ้มน้ำที่มากกว่าเส้นใยอายุ 6 เดือนเล็กน้อย (แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$) สอดคล้องกับการศึกษาของ Razali *et al.* (2015) ที่พบว่า เมื่ออายุเส้นใยจากต้นกระเจี๊ยบเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใยแบบแปรผันตรง มีค่าลดลง เนื่องจากมีปริมาณเซลลูโลสซึ่งมีความชอบน้ำสูง เป็นองค์ประกอบในเส้นใยกระเจี๊ยบลดลงเมื่ออายุของเส้นใยเพิ่มขึ้น

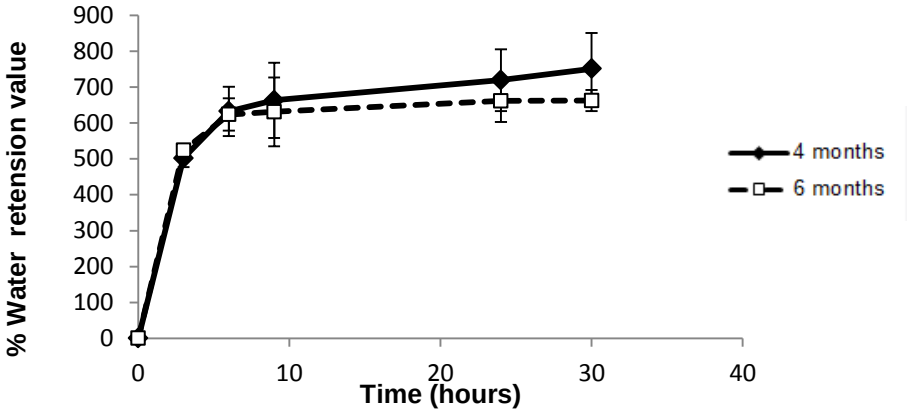


Figure 5 Water retention values of water hyacinth fibers.

คุณสมบัติของเส้นด้ายจากเส้นใยผักตบชวาผสมกับเส้นใยฝ้าย

จากสมบัติของเส้นใยผักตบชวาที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างกัน จึงเลือกเส้นใยผักตบชวาที่ 4 เดือน มาทำการปั่นผสมกับเส้นใยฝ้ายในระบบ OE spinning ระดับห้องปฏิบัติการ สมบัติของเส้นด้ายปั่นผสมระหว่างเส้นใยผักตบชวาและเส้นใยฝ้ายในสัดส่วน 50/50 เปรียบเทียบกับการปั่นเส้นด้ายจากใยฝ้าย 100% (Table 3) พบว่าเมื่อเส้นด้ายทั้งสองชนิดมีขนาดที่เท่ากัน (59.1 tex) เส้นด้ายปั่นผสมจะมีความแข็งแรงจำเพาะและความสามารถในการยืดตัวที่ลดลง อาจเนื่องจากเส้นใยผักตบชวามีความแข็งแรงจำเพาะที่ต่ำกว่าเส้นใยฝ้าย (36 g/tex ; Anonymous, 2015) เมื่อนำมาปั่นผสมจึงทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่าต่ำลง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งแรงจำเพาะของด้ายปั่นผสม 50/50 ที่ลดลง 36% เมื่อผสมเส้นใยผักตบชวาถึง 50% ยังสามารถนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ไม่ต้องการความแข็งแรงที่สูงมากนัก สำหรับสมบัติความสม่ำเสมอ พบว่า การมีเส้นใยผักตบชวาผสมทำให้เส้นด้ายมีความไม่สม่ำเสมอ พื้นที่หนา บาง ปม และการขึ้นขนเพิ่มขึ้น สาเหตุที่ทำให้เส้นด้ายมีคุณสมบัติลดลง เนื่องจากเส้นใยผักตบชวาเป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่และเป็นเส้นตรง ไม่มีการหยิกงอ (crimp) ทำให้การเกาะเกี่ยวกับเส้นใยอื่น ๆ ได้น้อย ทำให้ความแข็งแรงลดลง และการที่เส้นใยใหญ่เมื่อนำมาเข้าเกลียวทำให้เส้นใยกระจายที่ผิว และโผล่ออกจากเส้น ทำให้ความสม่ำเสมอลดลง (Sinha and Ghosh,1978) จากผลดังกล่าว ควรนำเส้นใยผักตบชวามาเตรียมให้มีขนาดที่เล็กลงด้วยวิธีทางเคมี หรือทางกล เพื่อการใช้ประโยชน์ที่มากขึ้น หรือใช้เส้นใยผักตบชวาที่ต้องการเน้นความเป็นด้ายแฟนซีที่มีปุ่มปม สำหรับผลิตภัณฑ์อื่น เช่น กระเป๋า หมวก รองเท้า ผลิตภัณฑ์ตกแต่งประดับเป็นต้น

สรุป

อายุของผักตบชวามีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยผักตบชวา โดยเส้นใยจากลำต้นผักตบชวาที่มีอายุ 4 เดือน จะมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าที่อายุ 6 เดือน ดังนั้น ในการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ในทางสิ่งทอ หรือเพื่อเสริมแรงให้แก่คอมพอสิท จึงควรเลือกใช้ผักตบชวาที่มีอายุเท่ากับ 4 เดือน โดยผักตบชวาเป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่และเป็นเส้นตรง ไม่มีการหยิกงอ (crimp) ทำให้การเกาะเกี่ยวกับเส้นใยอื่น ๆ ได้น้อย เมื่อมาผสมกับฝ้ายที่ 50% สำหรับเส้นด้ายขนาด 10 Ne (59.1 tex) ทำให้ความแข็งแรงลดลง และความสม่ำเสมอลดลง จากผลดังกล่าว ควรนำเส้นใยผักตบชวามาเตรียมให้มีขนาดที่เล็กลงด้วยวิธีทางเคมี หรือทางกล เพื่อการใช้ประโยชน์ที่มากขึ้น หรือใช้เส้นใยผักตบชวาที่ต้องการเน้นความเป็นด้ายแฟนซีที่มีปุ่มปมเพื่อผลิตภัณฑ์เคหะสิ่งทอ หรือเครื่องประดับตกแต่ง เป็นต้น

Table 3 Physical properties of water hyacinth and cotton fiber blended yarns at different ratios.

Water hyacinth / cotton fiber	50/50	0/100
Yarn number, Ne (tex)	10 (59.1)	10 (59.1)
Twist number, turns/inch	15.62	15.62
Mechanical properties		
Tenacity, (cN/tex)	7.52 ± 0.63^{b}	11.10 ± 1.50^{a}
Elongation,%	6.56 ± 0.68^{b}	7.21 ± 0.56^{a}
Yarn unevenness		
CV of unevenness, %	20.05^{a}	13.00^{b}
Thin places, -50%	581^{a}	2^{b}
Thick places, +50%	886^{a}	20^{b}
Neps, +200%	5139^{a}	151^{b}
Hairiness	7.41^{a}	6.36^{b}

Different letters (a, b) in the same row mean that the results are significantly different at $p \leq 0.05$ by Duncan's Multiple-Range Test.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมูลนิธิโทเรเพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย สำหรับการสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านผักตบชวาไม้ตรา จ.พระนครศรีอยุธยา สำหรับวัตถุดิบผักตบชวา และบริษัทก้องเกียรติเท็กซ์ไทล์ จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ในการปั่นด้ายระดับห้องปฏิบัติการด้วยระบบ OE spinning

เอกสารอ้างอิง

ชาญชัย สิริเกษมเลิศ. 2556. **ผลิตภัณฑ์เคหะสิ่งทอจากเส้นใยผักตบชวา**. แหล่งที่มา: http://www.ttistextiledigest.com/articles/technology/item/5218. ผลิตภัณฑ์เคหะสิ่งทอจากเส้นใยผักตบชวา.html

นิรนาม. 2558. นวัตกรรมสิ่งทอจากผักตบชวา. **เดลินิวส์**. แหล่งที่มา: http://www.dailynews.co.th/it/320453. 29 ตุลาคม 2558.

บุรฉัตร ฉัตรวีระ, พิชัย นิมิตสองสกุล, 2538, การประยุกต์ใช้เส้นใยผักตบชวาเสริมในแผ่นหลังคา. **วิศวกรรมสาร ฉบับ วส.ท เทคโนโลยี**, หน้า 35-42

ประมวล อุปกิจ. 2557. กรมโยธาธิการและผังเมือง จัดโครงการกำจัดผักตบชวาในแหล่งน้ำ ตามโครงการ "คลองสวย น้ำใส คนไทยมีความสุข". **ข้อมูลจังหวัดพะเยา**. แหล่งที่มา: http://region3.prd.go.th/prphayao/news/141217130209/ข่าว%20สำนักงานประชาสัมพันธ์จังหวัดพะเยา. 14 พฤศจิกายน 2558.

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2557. **รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนารูปแบบและการบริหารการจัดการผลิตภัณฑ์** OTOP **ประเภทผ้าและเครื่องแต่งกาย พื้นที่ภาคเหนือและภาคกลาง เสนอต่อ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ.

สมพร วาสะสิริ. 2558. ผืนผ้าจากเส้นใยผักตบชวาผสมด้ายฝ้าย. **วารสารศิลปกรรมศาสตร์วิชาการวิจัยและงานสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**. ฉบับที่ 2: หน้า 210-227.

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, รุจิระ ขอจิตต์เมตต์, กัญจนา บุญยืนวิทย และ นิมลรัตน์ สุประภากร. 2533. **การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยผักตบชวามาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ**. แหล่งที่มา: http://www.researchgate.net/publication/39025829_. 22 ตุลาคม 2558.

Anonymous. 2015. **Fiber and fabric properties**. Available source: http://www.natureworksllc.com/~/media/Technical_Resources/Fact_Sheets/Fibers/FactSheet_Fabrics_Fiber_FabricProperties_pdf.pdf. November 14, 2015.

Browning, B.L. 1967. **Methods of wood chemistry**. Interscience publishers, New York.

Jaktorn, C. and S. Jiajitsawat. 2014. Production of thermal insulator from water hyacinth fiber and natural rubber latex. **NU. International Journal of Science**. 11: 31-41.

Kataoka, Y. and T.Kondo. 1998. FT-IR microscopic analysis of changing cellulose crystalline structure during wood cell wall formation. **Macromolecules**. 31: 760-764.

Methacanon, P., U. Weerawatsophon, N. Sumransin, C. Prahsarn and D.T. Bergado. 2010. Properties and potential application of the selected natural geotextiles. **Carbohydrate Polymer**. 82: 1090-1096.

Paiva, M. C., I. Amma, A.R. Campos, R.B. Cheikh and A.M. Cunha. 2007. Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization. **Composites Science and Technology**. 67, 1132–1138.

Razali, N., M.S. Salit, M. Jawaid, M.R. Ishak and Y. Lazim. 2015. A study on chemical composition, physical, tensile, morphological and thermal properties of roselle fibre: effect of fibre maturity. **Bioresources**. 10: 1803-1824.

Reddy, N. and Y. Yang. 2005. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. **Trends in Biotechnology**. 23: 22-27.

Rowell R.M., J.S. Han, J.S. Rowell. 2000. Characterization and factors effecting fiber properties, *In* **Natural Polymers and Agrofibers Composites**. *Eds.* Frollini E, Leao AL, Mattoso LHC. San Carlos – Brazil, p.118.

Sinha, M.K., and Ghosk, S.K. 1978. **Annual report of jute technological res. laboratories**, Calcutta, 14.

การเปรียบเทียบการเจริญและการผลิตลิพิดระหว่าง *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 ในบ่อเปิดแบบรางคู่

Comparison of algal growth and lipid production between *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 and *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 in an open raceway pond

ภาณินี จรุงกีรติวิมล[1] จารุวรรณ ชลสงคราม[1] วีระสิทธิ์ สรรพมงคลไชย[1] สุมัลลิกา โมลากุล[1]
และ ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์[1*]

Paninee Jarungkeerativimol[1], Jaruwan Chonsongkram[1], Werasit Sappamongkolchai[1], Sumallika Morakul[1]
and Pramuk Parakulsuksatid[1*]

บทคัดย่อ

สาหร่ายจำนวนสองสายพันธุ์คือ *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella sp.* IFRPD No. 1092 เพาะเลี้ยงในอาหาร NS III ปริมาตร 100 ลิตร ในบ่อเปิดแบบรางคู่ที่เสริมอากาศผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นชีวมวล อัตราการผลิตชีวมวลเชิงปริมาตร ความเข้มข้นลิพิดและการผลิตลิพิดเชิงปริมาตรของ *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 (0.865 กรัมต่อลิตร 76.250 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน 0.167 กรัมต่อลิตร 14.685 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ) สูงกว่า *Chlorella sp.* IFRPD No. 1092 (0.433 กรัมต่อลิตร 31.251 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน 0.137 กรัมต่อลิตร 8.258 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ) ในขณะที่ปริมาณลิพิด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของ *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 (29.737% (w/w)) น้อยกว่า *Chlorella sp.* IFRPD No. 1092 (32.814% (w/w)) นอกจากนี้ สัดส่วนกรดไขมันที่พบใน *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 มีความคล้ายคลึงกับกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม แสดงว่าสาหร่าย *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 มีศักยภาพในการเจริญภายใต้การเพาะเลี้ยงแบบโฟโตออโตทรอฟเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

ABSTRACT

Two microalgal strains, *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 and *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092, were cultivated with 100 L NS III medium in an open raceway pond aerated with 2% v/v CO_2. The biomass concentration and productivity, and lipid concentration and productivity of *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 (0.865 g/L, 76.250 mg/L/d, 0.167 g/L, 14.685 mg/L/d respectively) were higher than those of *Chlorella sp.* IFRPD No. 1092 (0.433 g/L, 31.250 mg/L/d, 0.137 g/L, 8.528 mg/L/d respectively), whereas lipid content of *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 (29.737% (w/w)) was less than that of *Chlorella sp.* IFRPD No. 1092 (32.814% (w/w)). In addition, the fatty acid profiles of in *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 were similar to fatty acids found in palm oil. The results of *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 showed that the strain is potential, growing microalgal under photoautotrophic cultivation for biodiesel production.

Key Words: microalgal, biomass, lipid production, raceway pond, photoautotrophic culture

* Corresponding author; e-mail address: **fagipmp@ku.ac.th**

[1] ภาคเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพ 10900

[1] Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูงและขาดเสถียรภาพด้านราคา ส่งผลกระทบต่อประเทศที่นำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นเพื่อใช้ในด้านกระบวนการผลิตและการแปรรูป ด้านการคมนาคม และด้านต่างๆ ดังนั้นหลายประเทศจึงได้ให้ความสำคัญของการวิจัยและพัฒนาพลังงานทางเลือก โดยเฉพาะการศึกษาด้านการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่ายน้ำมัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดลงต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลให้ต่ำลง การเลือกสิ่งมีชีวิตที่มีความเหมาะสมในฐานะผู้ผลิตไบโอดีเซล ซึ่งสาหร่ายมีแนวโน้มมากที่สุดสำหรับขั้นตอนนี้ (Huang and Su, 2014) เนื่องจากสาหร่ายขนาดเล็กมีการเจริญอย่างรวดเร็ว จึงไม่ต้องแข่งขันกับการปลูกพืชบนดินเพื่อใช้เป็นพืชอาหาร และสามารถเก็บเกี่ยวนำไปใช้ผลิตพลังงานได้ต่อเนื่อง (Nascimento *et al*., 2015) สาหร่ายสามารถเจริญได้รวดเร็วกว่าพืชบก 100 เท่า จึงสามารถเพิ่มการผลิตชีวมวลได้ในเวลาที่น้อยกว่าหนึ่งวัน เนื่องจากโครงสร้างและองค์ประกอบที่ไม่ซับซ้อน ทำให้สาหร่ายเจริญได้อย่างรวดเร็ว สาหร่ายคาดว่ามีประสิทธิภาพการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าพืชสูงถึง 10-50 เท่า แสดงให้เห็นถึงสาหร่ายมีประสิทธิภาพการตรึงแก๊สชนิดนี้และที่น่าสนใจคือ การสร้างชีวมวลของสาหร่ายเกิดจากการสังเคราะห์แสงที่เป็นทรัพยากรที่สามารถใช้ได้อย่างไม่หมดสิ้น (renewable resource) ในการเพาะเลี้ยงระบบเปิดสามารถใช้แสงอาทิตย์ได้โดยตรงและสามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้ในปริมาณมาก ทำให้การเพาะเลี้ยงระบบนี้มีต้นทุนต่ำ การเพาะเลี้ยงระบบเปิดมีข้อจำกัดเรื่องการอยู่รอดของสาหร่ายในบ่อเพาะเลี้ยงและการดำรงสภาพของสายพันธุ์ชนิดเดียว บ่อเพาะเลี้ยงแบบที่นิยมมากที่สุด คือบ่อระบบน้ำวนที่มีใบพัดสำหรับกวนน้ำ (raceway pond) ดังนั้นการเปรียบเทียบการเจริญและการผลิตลิพิดของสาหร่าย จึงเป็นขั้นตอนของการคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายเพื่อผลิตลิพิดสำหรับการผลิตไบโอดีเซล เพื่อส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายขนาดเล็กสำหรับการผลิตพลังงานทดแทนที่ใช้ได้จริง ตลอดจนเพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์

จากการศึกษาของจารุวรรณ (2558) ได้คัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็ก จำนวน 40 สายพันธุ์ ที่เพาะเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร NS III ในตู้ควบคุมการเจริญเติบโตภายใต้การเพาะเลี้ยงแบบโฟโตออโตทรอฟ เป็นเวลา 7 วัน พบว่า สาหร่ายจำนวน 9 สายพันธุ์ได้ผ่านการคัดเลือก โดยสาหร่ายสายพันธุ์ *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 สามารถให้ชีวมวลและลิพิดที่สูงสุด การศึกษาครั้งนี้ เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายจากการเปรียบเทียบการเจริญและการผลิตลิพิดในบ่อเปิดแบบรางคู่ โดยการเพาะเลี้ยงแบบโฟโตออโตทรอฟ

อุปกรณ์และวิธีการ

สายพันธุ์สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก

สาหร่ายสีเขียวขนาดเล็กที่ใช้ทดลองได้รับจากห้องปฏิบัติการสาหร่าย ฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จำนวน 2 สายพันธุ์ คือ *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 เก็บรักษาหัวเชื้อสาหร่ายโดยเพาะเลี้ยงในอาหารแข็งสูตร NS III (Hosakul, 1972) ปริมาตร 1 ลิตร ประกอบด้วย KNO_3 1.01 กรัม KH_2PO_4 0.40 กรัม $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ 0.28 กรัม $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.12 กรัม $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0.015 กรัม NaCl 0.11 สารละลาย A ปริมาตร 1 ลิตร (ใช้ปริมาตร 2 มิลลิลิตร) ประกอบด้วย KBr 0.592 กรัม KI 0.415 กรัม LiCl 0.021 กรัม H_3BO_3 0.077 กรัม HCl 3.0

มิลลิลิตร สารละลาย B ปริมาตร 1 ลิตร (ใช้ปริมาตร 2 มิลลิลิตร) ประกอบด้วย $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 0.05 กรัม HCl 3.0 มิลลิลิตร สารละลาย C ปริมาตร 1 ลิตร (ใช้ปริมาตร 2 มิลลิลิตร) ประกอบด้วย $Fe(NO_3) \cdot 9H_2O$ 0.81 กรัม EDTA 0.75 กรัม สำหรับอาหารแข็งเติมวุ้นลงไป 14 กรัมต่อลิตร ละลายส่วนผสมทั้งหมดและฆ่าเชื้อโดยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที ควบคุมการเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีสัดส่วนระยะเวลาการให้แสงต่อมืดเท่ากับ 16:8 ชั่วโมง ความเข้มแสง 10-12.5 กิโลลักซ์

การเตรียมกล้าเชื้อสาหร่ายเพื่อการเพาะเลี้ยงในบ่อเปิดแบบรางคู่

การเตรียมกล้าเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กโดยเขี่ยเชื้อลงในอาหารเหลวสูตร NS III ให้แสงโดยหลอดไฟชนิด cool white แสงต่อมืดเท่ากับ 16:8 ชั่วโมง ความเข้มแสง 10-12.5 กิโลลักซ์ อากาศที่ใช้เพาะเลี้ยงสาหร่ายจะเป็นอากาศผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ที่ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และหมุนเวียนน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำ ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส นำสาหร่ายขนาดเล็กเลี้ยงขยายต่อในถาดเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบเขย่าระบบเปิด ปริมาตรรวมทั้งหมด 36 ลิตร พร้อมทั้งให้อากาศที่ผสมระหว่างอากาศและคาร์บอนไดออกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเลี้ยงขยายต่อในบ่อเปิดแบบรางคู่ปริมาตร 100 ลิตร ให้เซลล์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.2 ที่ความยาวคลื่นแสง 680 นาโนเมตร เพาะเลี้ยงจนเข้าสู่ระยะคงที่ (stationary phase)

การวิเคราะห์ความเข้มข้นชีวมวลแห้งสาหร่าย

การวิเคราะห์ความเข้มข้นชีวมวลแห้งสาหร่ายโดยอาศัยวิธีการดัดแปลงของ AOAC (2012; อ้างโดยจารุวรรณ (2558)) นำตัวอย่างสาหร่ายปริมาตร 20 มิลลิลิตร กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C DIA 47 มิลลิเมตร ขนาดรู 0.6 ไมโครเมตร ที่ผ่านการอบแห้งและชั่งหาน้ำหนัก ต่อชุดกรองเข้ากับปั๊มสุญญากาศและใช้น้ำกลั่นล้างชีวมวลสาหร่าย นำแผ่นกระดาษกรองที่มีเซลล์สาหร่ายอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น 15-30 นาที ชั่งหาน้ำหนักชีวมวลแห้งสุดท้ายและนำค่าไปคำนวณหาความเข้มข้นของชีวมวลแห้ง

การวิเคราะห์ปริมาณลิพิด

ปริมาณลิพิดของสาหร่ายวิเคราะห์โดยอาศัยวิธีการดัดแปลงของ Bligh and Dyer (1959; อ้างโดยจารุวรรณ (2558)) เซลล์เปียกของสาหร่ายขนาดเล็ก 50 มิลลิลิตร ปั่นแยกเซลล์สาหร่ายที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาทีและเทส่วนใสทิ้ง นำเซลล์สาหร่ายเติมน้ำกลั่น 1.0 มิลลิลิตร เมทานอล 2.0 มิลลิลิตร และคลอโรฟอร์ม 1.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยเครื่องเขย่า 30 วินาที ทำให้เซลล์แตกโดยอ่างอัลตร้าโซนิก ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที เติมคลอโรฟอร์ม 1.0 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 1.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที นำหลอดทดลองไปปั่นแยกตะกอนและดูดสารละลายส่วนบนที่เป็นน้ำและเมทานอลทิ้ง เก็บสารละลายส่วนล่างที่มีคลอโรฟอร์มและลิพิด ทำซ้ำ 3-4 ครั้ง จนของเหลวที่สกัดได้ไม่มีสี กรองสารสกัดอินทรีย์ด้วยแผ่นกรองที่ชุ่มคลอโรฟอร์มลงในภาชนะที่ทราบน้ำหนัก นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง นำไปไว้ในโถดูดความชื้นประมาณ 15-30 นาที ชั่งน้ำหนักลิพิดและคำนวณความเข้มข้นของลิพิด

การวิเคราะห์ปริมาณไนเทรต

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเทรตตามวิธีการของ APHA (1998; อ้างโดยจารุวรรณ (2558))

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันอาศัยวิธีการดัดแปลงของ Ríos *et al.* (2013) ซึ่งมีวิธีวิเคราะห์ดังนี้

การเตรียมอนุพันธ์ของกรดไขมัน

เซลล์เปียกของสาหร่ายขนาดเล็กปริมาตร 15 มิลลิลิตร ปั่นเหวี่ยงที่ 5000 รอบต่อนาที 15 นาที เทส่วนใสทิ้งและล้างชีวมวลสาหร่ายด้วยน้ำกลั่น โดยเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร และนำไปปั่นเหวี่ยง เติม methanol: hydrochloric acid: chloroform; 10:1:1 v/v/v) ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและนำหลอดทดลองใส่ในเครื่องอุลตร้าโซนิคที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 40 นาที เมื่อครบเวลานำมาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน เติม hexane: chloroform; 4:1 v/v) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและปั่นเหวียง ดูดสารละลายส่วนบนใส่หลอดสีชา (ขวดสำหรับใช้วิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี) ที่เติม internal standard ปริมาตร 50 ไมโครลิตร นำไประเหยและเก็บรักษาอนุพันธ์ของกรดไขมันไว้ที่อุณหภูมิ – 20 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี

การวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันอาศัยวิธีการดัดแปลงของ Sigma-Aldrich Co. (2003; อ้างโดย จารุวรรณ (2558)) ตัวอย่างของอนุพันธ์ของกรดไขมันถูกนำมาเติมเฮกเซนปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และกรองผ่าน nylon syring filter ขนาดรูกรอง 0.2 ไมครอน ฉีดตัวอย่างปริมาตร 1 ไมโครลิตร เพื่อหาองค์ ประกอบของกรดไขมันโดยแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-FID; Agilent Technology 6890N, Gemany (Network GC system)) และใช้ Agilent J&M GC HP-FFAP ความยาว 25 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.320 มิลลิเมตร ความหนานของฟิล์ม 0.5 ไมโครเมตร ช่วงอุณหภูมิ 60-240 องศาเซลเซียส และมีสภาวะของการวิเคราะห์ดังนี้ ขั้นตอนแรกตั้งอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และเพิ่มอุณหภูมิเป็นอัตรา อัตราละ 4 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั้งอุณหภูมิถึง 230 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนสุดท้ายเพิ่มอุณหภูมิและให้อุณหภูมิคงที่เป็น 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้เฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊สฮีเลียมที่มีอัตราการไหลที่ 1 มิลลิลิตรต่อนาที เลือกโหมดฉีดแบบ split ที่อัตราส่วน 50:1 ควบคุมอุณหภูมิบริเวณส่วนฉีด (injector) และดีเทคเตอร์ (detector) ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และทำการเปรียบเทียบกรดไขมันของสาหร่ายกับกรดไขมันเอทิลเอสเทอร์มาตรฐาน

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ตามวิธีการของ Yeh *et al.* (2012; อ้างโดยจารุวรรณ (2558))

อัตราการผลิตชีวมวลเชิงปริมาตร (Biomass productivity, Q_x)

$$Q_x = \frac{C_t - C_0}{t_t - t_0}$$

โดยสัญลักษณ์ Q_x แทนอัตราการผลิตชีวมวลเชิงปริมาตร (กรัมต่อลิตรต่อวัน) สัญลักษณ์ C_t แทนความเข้มข้นของชีวมวลสาหร่ายที่เวลาใด ๆ (กรัมต่อลิตร) สัญลักษณ์ C_0 แทนความเข้มข้นเริ่มต้นของชีวมวลสาหร่าย (กรัมต่อลิตร) สัญลักษณ์ t_t แทนเวลาใด ๆ (วัน) และสัญลักษณ์ t_0 แทนเวลาที่ 0 (วัน)

ปริมาณลิพิด (Lipid content , LC (%, w/w)

$$LC = \frac{C_p}{C_x} \times 100$$

โดยสัญลักษณ์ LC แทนปริมาณลิพิด (%, w/w) สัญลักษณ์ C_p แทนความเข้มข้นลิพิด (กรัมต่อลิตร) และสัญลักษณ์ C_x แทนน้ำหนักชีวมวลแห้ง (กรัมต่อลิตร)

อัตราการผลิตลิพิดเชิงปริมาตร (Lipid productivity, Q_p)

$$Q_p = \frac{Q_x \times LC}{100}$$

โดยสัญลักษณ์ Q_p แทนอัตราการผลิตลิพิดเชิงปริมาตร (กรัมต่อลิตรต่อวัน) สัญลักษณ์ Q_x แทนอัตราการผลิตเซลล์เชิงปริมาตร (กรัมต่อลิตรต่อวัน) และสัญลักษณ์ LC แทนปริมาณลิพิด (%, w/w)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การเพาะเลี้ยง *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 ในบ่อเปิดแบบรางคู่

การเจริญและการผลิตลิพิดของสาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์ในบ่อเปิดแบบรางคู่ ที่มีอาหารเหลวสูตร NS III ปริมาตร 100 ลิตร มีความเข้มข้นชีวมวลเริ่มต้นเท่ากับ 0.118 และ 0.143 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ความเข้มข้นของชีวมวลของสาหร่ายเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาเพาะเลี้ยงแสดงดังภาพที่ 1A และ 1B โดยพบความเข้มข้นชีวมวลและลิพิดของ*Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 สูงสุดในวันที่ 24 และ 26 ของการเพาะเลี้ยงมีค่าเท่ากับ 0.865 และ 0.165 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนสาหร่าย *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 มีความเข้มข้นชีวมวลและลิพิดสูงสุดในวันที่ 20 และ 18 ของการเพาะเลี้ยงมีค่าเท่ากับ 0.433 และ 0.137 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนปริมาณลิพิด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของ *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 29.737 และ 32.814 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 6 และ 18 ของการเพาะเลี้ยง ตามลำดับ

การใช้ไนเทรตของสาหร่าย *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1.01 กรัมต่อลิตร พบความเข้มข้นของไนเทรตลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดการเพาะเลี้ยง การลดลงของความเข้มข้นไนเทรตสอดคล้องกับการผลิตชีวมวลและลิพิด เนื่องจากไนเทรตถูกใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนในกระบวนการเมแทบอลิซึมในเซลล์เพื่อการเจริญและการผลิตลิพิดของสาหร่ายและในวันสุดท้ายของการเพาะเลี้ยงพบความเข้มข้นไนเทรตเหลืออยู่ในอาหารเท่ากับ 0.463 และ 0.605 กรัมต่อลิตร แสดงดังภาพที่ 1A และ 1B ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การเจริญและการผลิตลิพิดของสาหร่ายทั้ง 2 สายพันธุ์ พบว่า *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 มีอัตราการผลิตชีวมวลและลิพิดเชิงปริมาตรสูงกว่า *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 โดยสาหร่าย *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 มีอัตราการผลิตชีวมวลและลิพิดเชิงปริมาตรเท่ากับ 32.841 และ 14.685 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ในวันที่ 22 และ 4 ของการเพาะเลี้ยง ซึ่ง *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 มีอัตราการผลิตชีวมวลและลิพิดเชิงปริมาตรเท่ากับ 31.250 และ 8.528 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ในวันที่ 4 ของการเพาะเลี้ยง แสดงให้เห็นว่า *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 สร้างชีวมวลและผลิตลิพิดได้ดีกว่า *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 อาจเกิดจากอิทธิพลของการใช้ไน

เตรทของสาหร่าย *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 สูงกว่า *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 จึงทำให้มีการเจริญและการผลิตลิพิดที่ดี นอกจากนี้ปัจจัยกายภาพได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มแสง ประสิทธิภาพการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ล้วนมีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์

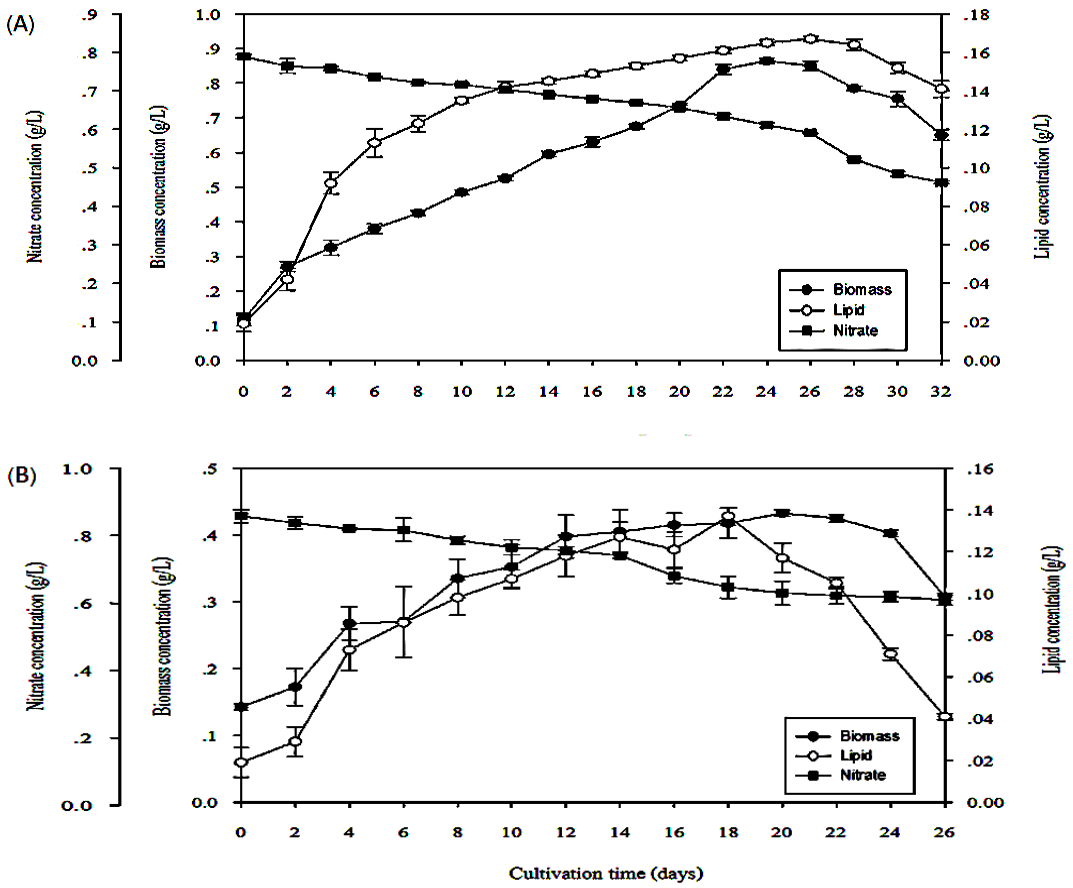


Figure 1 The photoautotrophic cultivation of *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 (A) and *Chlorella sp.* IFRPD No. 1092 (B) in an open raceway pond

Table 1 The best kinetic parameters of *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 and *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092

Species	Biomass concentration (g/L)	Biomass productivity (mg/L/d)	Lipid concentration (g/L)	Lipid productivity (mg/L/d)	Lipid content (%(w/w))
Ankistrodesmus sp. IFRPD No. 1061	0.865	76.250	0.167	14.685	29.737
Chlorella sp. IFRPD No. 1092	0.433	31.250	0.137	8.528	32.814

Ankistrodesmus sp. IFRPD No. 1061 and *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 were cultivated photoautotrophically in an open raceway containing 100 L NS III medium aerated with 2% v/v CO_2

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณกรดไขมันที่ได้จาก *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 โดยแก๊สโครมาโทรกราฟี

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่ผลิตได้จากสาหร่ายขนาดเล็ก *Ankistrodesmus* sp.

IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 ด้วยแก๊สโครมาโทรกราฟีและเปรียบเทียบกรดไขมันของสาหร่ายทั้ง 2 สายพันธุ์กับกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์มาตรฐาน พบกรดไขมันชนิดอิ่มตัวรวมทั้งสิ้น 60.095 และ 57.747 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวรวมทั้งสิ้น 39.905 และ 42.253 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดัง Table 2 ชนิดของกรดไขมันที่ได้จากสาหร่ายขนาดเล็ก *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 พบว่ามีปริมาณกรดปาร์มิติก กรดโอเลอิก และกรดสเตียริก มากที่สุดตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Wiliam and Millam (1961) กรดไขมันที่พบใน *Ankistrodesmus braunii* ส่วนใหญ่คือ กรดปาร์มิติก กรดโอเลอิก ส่วนกรดไขมันที่พบน้อยคือ กรดคาไพรลิก กรดคาพริก กรดลิวริก กรดไตรดีคาโนอิก กรดไมริสติก กรดเพนตะดีไซลิก กรดไขมันที่พบใน *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 พบมีปริมาณกรดกรดปาร์มิติก กรดอะราคิดิก กรดลิโนเลนิก กรดไอโคเซโนอิก กรดโอเลอิก และกรดพาล์ไมโตเลอิกมากที่สุดตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Mata *et al* (2010) กรดไขมันที่พบในสาหร่าย *Chlorella kessleri* ซึ่งมีกรดปาร์มิติกสูงสุดเท่ากับ 28.180 เปอร์เซ็นต์ มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองคือ 25.491 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ความแตกต่างของชนิดและปริมาณของกรดไขมันขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย สารอาหารที่ได้รับ และระบบที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง เป็นต้น กรดไขมันที่ได้จากสาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมัน C16 และ C18 ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืช ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซล (Huang *et al*., 2010)

Table 2 Fatty acid methyl esters (FAME) profile and lipid content of *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 and *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092

Type of FAME	FAME	Lipid content	
		Ankistrodesmus sp.IFRPD No. 1061	*Chlorella* sp. IFRPD No. 1092
Saturated fatty acid	Caprylic acid (C8:0)	0.254	1.585
	Capric acid (C10:0)	0.443	1.359
	Lauric acid (C12:0)	0.414	0.259
	Tridecanoic acid (C13:0)	0.255	0.306
	Myristic acid (C14:0)	0.585	0.195
	Pentadecylic acid (C15:0)	0.356	0.453
	Palmitic acid (C16:0)	34.431	25.491
	Margaric acid (C17:0)	5.291	1.202
	Stearic acid (C18:0)	17.029	2.699
	Arachidic acid (C20:0)	0.589	15.866
	Behenic acid (C22:0)	0.448	8.331
	Total	60.095	57.746
Usaturated fatty acid	Myristoleic acid (C14:1)	0.623	0.435
	Palmitoleicacid acid (C16:1)	2.876	4.176
	Oleic acid (C18:1)	20.086	5.485
	Linoleic acid (C18:2)	14.26	2.135
	Linolenic acid (C18:3)	1.103	14.83
	Eicosenoic acid (C20:1)	0.448	12.195
	Erucic acid (C22:1)	0.509	2.997
	Total	39.905	42.253

สรุป

การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์การเจริญและการผลิตลิพิดของสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในบ่อเปิดแบบรางคู่ ภายใต้การเพาะเลี้ยงแบบโฟโตออโตทรอฟ *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 ให้อัตราการผลิตชีวมวลและลิพิดเชิงปริมาตรสูงกว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 และเมื่อวิเคราะห์ชนิดและปริมาณกรดไขมันที่ได้จาก *Ankistrodesmus* sp. IFRPD No. 1061 และ *Chlorella* sp. IFRPD No. 1092 โดยวิธีแก๊สโครมาโทรกราฟี สาหร่ายทั้งสองสายพันธุ์เหมาะสมในการใช้ผลิตไบโอดีเซล

เอกสารอ้างอิง

จารุวรรณ ชลสงคราม. 2558. **การคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็กที่มีปริมาณลิพิดสูงและเพิ่มปริมาณลิพิดโดยการเลี้ยงแบบมิกโซทรอฟ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

AOAC. 2012. **AOAC Official Methods of Analysis of AOAC** (Association of Official Agricultural Chemists) (18th Edn). Gaithersburg, USA: AOAC.

APHA. 1998. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th Edn. American Public Health Association, Washington, DC. ISBN: 0875532357, (4500 Nitrate Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method)

Bligh, E.G. and W.J. Dyer. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Physiology and Biochemistry**. 37: 911-917.

Huang, G.H., F. Chen, D. Wei, X.W. Zhang and G. Chen. 2010. Biodiesel production by microalgal biotechnology. **Applied Energy**. 87: 38-46.

Huang, Y.T. and C.P. Su. 2014. High lipid content and productivity of cultivating under elevated carbon dioxide. **International Journal of Environmental Science and Technology**. 11(3): 703-710.

Mata, T.M., A.A. Martins and N.S. Caetano. 2010. for biodiesel production and other applications: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14: 217-232.

Nascimento, I.A., I.T.D. Cabanelas, J.N.d. Santos, M.A. Nascimento, L. Sousa and G. Sansone. 2015. Biodiesel yields and fuel quality as criteria for algal-feedstock selection: Effects of CO_2-supplementation and nutrient levels in cultures. **Algal Research**. 8: 53-60.

Ríos, S.D., J. Castaneda, C. Torras, X. Farriol and J. Salvado. 2013. Lipid extraction methods from biomass harvested by two different paths: screening studies toward biodiesel production. **Bioresource Technology**. 133: 378-388.

Sigma-Aldrich Co. 2003. **Lipid Standards**. Bellefonte, PA, USA.

Williams, V.R and M. Millan. 1961. Lipids of *Ankistrodesmus braunii*. **Science**. 133: 459-470.

Yeh, K.L., C.Y. Chen and J.S. Chang. 2012. pH-stat photoheterotrophic cultivation of indigenous *Chlorella vulgaris* ESP-31 for biomass and lipid production using acetic acid as the carbon source. **Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal** 64: 1-7.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคบรรยาย

Oral Presentation

การจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียนโดยการมีส่วนร่วมของนักเรียน : กรณีศึกษาโรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม

Solid waste management in school by students participatory: A case study of Anubanwatpichaisongkram school.

สัตตบงกช ยอดแก้ว รัมภา พจนาคุณากร ศักดิ์ศรี รักไทย ภาณุชัย ประมวล และณัฐกร อินทรวิชะ

Sattabongkot Yodkeaw , Rumpha Potchanakunakorn , Saksri Rakthai , Phanuchai Pamuanl and Nuttakron Intaravicha

บทคัดย่อ

การศึกษาแนวทางการจัดการมูลฝอยโดยการมีส่วนร่วมของนักเรียน กรณีศึกษาโรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณ วิเคราะห์ผลกระทบ และสร้างแนวทางการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียน กลุ่มตัวอย่างคือนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 จำนวน 159 คนที่ได้มาจากการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาคือแบบสอบถาม และการสนทนากลุ่ม วิเคราะห์ผลการศึกษาโดยใช้ค่าร้อยละ และค่าเฉลี่ย ผลการศึกษาพบว่ามูลฝอยที่พบภายในโรงเรียนประกอบไปด้วยมูลฝอยทั่วไปและเศษอาหารรวมเฉลี่ย 127.4 กิโลกรัมต่อวัน แหล่งกำเนิดที่พบมูลฝอยมากที่สุดคือห้องเรียนร้อยละ 39 ชนิด ปริมาณ สัดส่วนและการกระจายของมูลฝอยยังไม่เกิดผลกระทบต่อโรงเรียน แนวทางการจัดการมูลฝอยประกอบไปด้วย 2 แนวทาง คือการลดปริมาณการเกิดมูลฝอย และการเพิ่มมูลค่าของมูลฝอยซึ่งประกอบไปด้วย 4 กิจกรรมได้แก่ (1) รณรงค์ประชาสัมพันธ์ให้มีการคัดแยกมูลฝอยตามประเภท และทิ้งมูลฝอยให้ลงถังที่เตรียมไว้ (2) จัดการประกวดแข่งขันการทำสิ่งประดิษฐ์จากมูลฝอยระหว่างห้องเรียน (3) รวบรวมมูลฝอยทั่วไป เช่นพลาสติกและกระดาษเพื่อนำไปขาย และ (4) รวบรวมเศษอาหารเพื่อนำไปขายเป็นอาหารสัตว์

ABSTRACT

The objectives of the solid waste management in school by student participatory; a case study of Anubanwatpichaisongkram school were 1) to study kind and quantity of solid waste 2) to analyze impact of solid waste on school and 3) to create solid waste management guidelines for school. The samples of this study were 159 students in grade 5 by purposive sampling method. This study used questionnaires and focus group as tools for collecting data. The results were analyzed by percentage and average. The results showed that, there were 2 kinds of solid waste including general solid waste and food waste and theirs total average weight was 127.4 kilograms/ day. The outstanding point source of solid waste was classroom (39%) and there were 2 guidelines for solid waste management in school including reducing all of solid waste and adding solid waste values. The activities for supporting these guidelines were 4; organized the campaign for screening solid waste before leave into the right bin, contested the solid waste invention in school, gathered plastic bottle and used paper for sale, and collected food waste for animal feed.

Key Words: solid waste management, students participatory

* Corresponding author; e-mail address: angpao_7@hotmail.com

หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Department of Environmental Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Pathumwan Institute of Technology, Bangkok 10330

คำนำ

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาปัญหามูลฝอยของประเทศไทยมีแนวโน้มทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากร การขยายตัวทางเศรษฐกิจและการเปลี่ยนแปลงการบริโภคของประชากร มูลฝอยชุมชนที่เก็บขนได้สามารถนำไปกำจัดยังสถานที่กำจัดอย่างถูกต้องได้ประมาณ 7.421 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 52 ในขณะที่อีกประมาณ 6.938 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 48 เป็นการกำจัดแบบไม่ถูกต้อง เช่นการเผากลางแจ้ง การเทกองในบ่อดินเก่า หรือพื้นที่รกร้าง ซึ่งส่งผลต่อกระทบต่อสภาพแวดล้อมโดยรอบ อาทิกลิ่นเหม็นจากกองขยะ เขม่าฝุ่นละอองจากการเผา น้ำชะขยะไหลลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ (กรมควบคุมมลพิษ, 2557)

สถานศึกษาเป็นองค์กรหนึ่งที่สำคัญในการเป็นแหล่งพัฒนาศักยภาพด้านต่างๆ ให้กับสังคม ทั้งการผลิตบุคลากร การบริการวิชาการและการวิจัยซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมากกับการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศแต่ อย่างไรก็ตามสถานศึกษานั้นยังเป็นแหล่งผลิตมูลฝอยหลักแหล่งหนึ่งเช่นกัน ทั้งขยะทั่วไป ขยะรีไซเคิล เศษอาหาร ขยะอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงขยะอันตรายจากห้องปฏิบัติการและห้องพยาบาล (วรางคณา, 2554) ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้หากไม่มีมาตรการในการดำเนินการ มูลฝอยเหล่านี้จะกระจาย ส่งกลิ่นเหม็นและทำให้สภาพแวดล้อมในโรงเรียนเสื่อมโทรม ส่งผลเสียต่อการเรียนการสอนในชั้นเรียน แมลง และสัตว์พาหะโรครบกวน เกิดปัญหาสาธารสุขภายในโรงเรียน (วิทวัส, 2556)

ด้วยเหตุนี้จึงมีผู้สนใจให้ความสำคัญกับการจัดการมูลฝอยจำนวนมากที่มีความแตกต่างหลากหลายวิธี เช่นการจัดระบบคัดแยก การประชาสัมพันธ์การลดมูลฝอย รวมถึงการสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาวิธีการจัดการมูลฝอยแบบต่างๆ (สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2554) สำหรับการศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1)ศึกษาชนิดของมูลฝอยภายในโรงเรียน (2)วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากมูลฝอยภายในโรงเรียน (3)สร้างแนวทางการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียน ซึ่งเมื่อดำเนินการแล้วเสร็จนอกจากจะสามารถนำแนวทางการและกิจกรรมการจัดการมูลฝอยไปใช้ในโรงเรียนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการมูลฝอยในโรงเรียนแล้ว ยังสามารถใช้เป็นสถานศึกษาต้นแบบการจัดการมูลฝอยให้กับสถานศึกษาอื่นและชุมชนโดยรอบได้ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรได้แก่นักเรียนระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 ถึง 6 ทั้งหมดจำนวน 1,339 คน ของโรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงคราม จังหวัดสมุทรปราการ กลุ่มตัวอย่างได้จากการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (purposive sampling) โดยกำหนดให้เป็นนักเรียนระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 ของโรงเรียนทั้งหมด จำนวน 159 คนเนื่องจากเป็นนักเรียนกลุ่มที่จะเป็นผู้นำคือเป็นประธานนักเรียนและตัวแทนนักเรียนในปีต่อไป

การศึกษาชนิดของมูลฝอยภายในโรงเรียน

ศึกษาชนิดของมูลฝอยภายในโรงเรียนโดยใช้แบบสอบถามที่ผู้วิจัยออกแบบที่ผ่านการแก้ไขจากผู้เชี่ยวชาญเพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหา (content validity) และทดลองใช้ (try out) เพื่อหาค่าความเชื่อมั่น (reliability) เรียบร้อยแล้ว กับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 159 คน เกี่ยวกับบริเวณที่พบและแหล่งกำเนิดมูลฝอย

ภายในโรงเรียน และศึกษาปริมาณของมูลฝอยภายในโรงเรียน โดยการชั่งน้ำหนักของมูลฝอยที่เกิดขึ้นในโรงเรียนตลอดทั้งวัน เป็นระยะเวลา 5 วันติดต่อกัน

การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากมูลฝอยภายในโรงเรียน

วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากมูลฝอยภายในโรงเรียน 4 ด้านคือชนิด ปริมาณ สัดส่วนและการกระจายของมูลฝอยโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลทุติยภูมิเกี่ยวกับผลกระทบของมูลฝอยจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสร้างแนวทางการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียน

ศึกษาการสร้างแนวทางการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียนโดยการมีส่วนร่วมของนักเรียนด้วยการสนทนากลุ่ม (focus group) กับนักเรียนระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 จำนวน 10 คน โดยให้คุณครูประจำชั้นคัดเลือกนักเรียนที่มีความคิดสร้างสรรค์ กล้าแสดงออก เป็นผู้เข้าร่วมการสนทนากลุ่ม ในหัวข้อ "วิธีการในการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียน" จากนั้นนำผลที่ได้มาสร้างแนวทางการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียน

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาชนิดของมูลฝอยภายในโรงเรียน

จากการศึกษาชนิดของมูลฝอยที่เกิดขึ้นภายในโรงเรียนโดยใช้แบบสอบถาม พบว่ามูลฝอยภายในโรงเรียน มี 2 ประเภท คือ มูลฝอยทั่วไป และเศษอาหารจากโรงอาหาร โดยจำแนกเป็นมูลฝอยทั่วไป 15 ชนิด คือ ดินสอ ยางลบ ปากกา ไม้บรรทัด ขวดน้ำ แก้วน้ำ ถุงพลาสติก แก้ว ไม้ เศษผ้า เศษใบไม้ หลอดไฟ กล่องนม กระดาษ และปากกาลบคำผิด โดยมาจากแหล่งกำเนิด 5 แหล่ง ได้แก่ ห้องเรียน สนาม โรงอาหาร ห้องน้ำ และห้องพยาบาล คิดเป็นร้อยละ 39, 28, 19, 9 และ 5 ตามลำดับ แสดงใน Figure 1

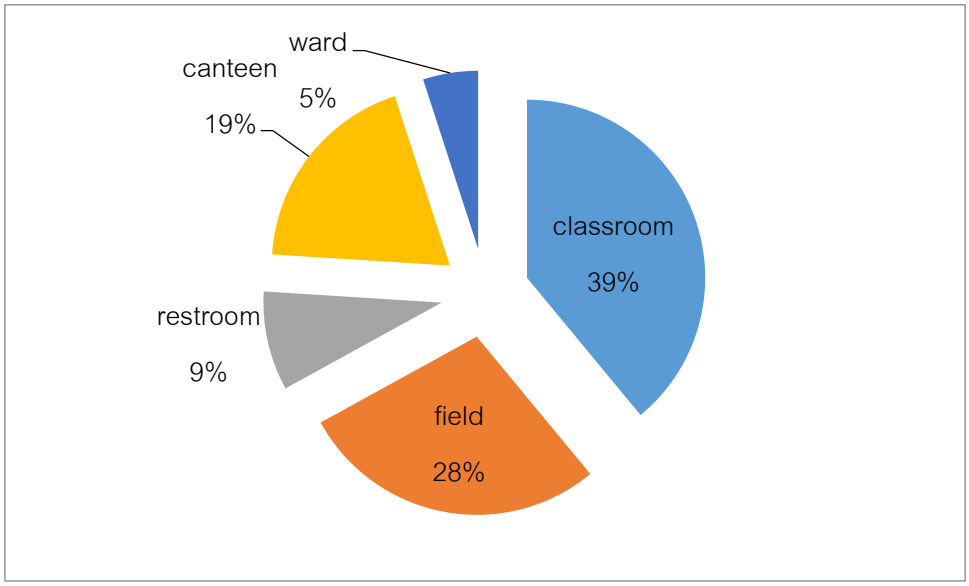


Figure 1 The percentage of point sources of solid waste in school

จากการศึกษาปริมาณของมูลฝอยโดยการชั่งน้ำหนักของมูลฝอยที่เกิดขึ้นในโรงเรียนตลอดทั้งวัน เป็นระยะเวลา 5 วันติดต่อกัน พบว่ามูลฝอยทั่วไปมีน้ำหนักต่ำสุด 65 กิโลกรัมต่อวัน น้ำหนักสูงสุด 163 กิโลกรัมต่อวัน และมีน้ำหนักเฉลี่ย 105 กิโลกรัมต่อวัน ในขณะที่เศษอาหารจากโรงอาหารมีน้ำหนักต่ำสุด 120 กิโลกรัมต่อวัน น้ำหนักสูงสุด 170 กิโลกรัมต่อวัน และมีน้ำหนักเฉลี่ย 149.8 กิโลกรัมต่อวัน ทั้งนี้คิดเป็นน้ำหนักรวมเฉลี่ย 127.4 กิโลกรัมต่อวัน ดังแสดงใน Table 1

Table 1 The quantities of solid waste in school

Kind of solid waste	Weight (Kilograms)					
	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Average
General solid waste	65	69	163	113	115	105
Food waste	133	170	161	165	120	149.8
Total	198	239	324	278	235	127.4

ผลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากมูลฝอยภายในโรงเรียน

จากการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบของมูลฝอยที่เกิดขึ้นภายในโรงเรียนโดยจำแนกเป็น 4 ประเด็น คือ ชนิด ปริมาณ สัดส่วน และการกระจายของมูลฝอย (เกษม, 2546) ผลการศึกษาพบว่า ชนิดของมูลฝอยที่พบภายในโรงเรียนไม่เกิดผลกระทบต่อโรงเรียน (0) ตามเกณฑ์ของแผนแม่บทการบริหารจัดการมูลฝอยของประเทศปี 2559 -2564 เนื่องจากไม่มีมูลฝอยที่เป็นมูลฝอยติดเชื้อและมูลฝอยอันตราย พบเพียงมูลฝอยทั่วไปและเศษอาหาร ปริมาณมูลฝอยที่พบภายในโรงเรียนมีปริมาณไม่มากพอที่จะเกิดผลกระทบ (0) (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) เนื่องจากถึงแม้ว่าจะพบมูลฝอยรวมสูงสุดเท่ากับ 324 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งจำแนกเป็นมูลฝอยทั่วไปและเศษอาหาร แต่มูลฝอยทั้ง 2 ประเภทนี้ถูกเก็บรวบรวมและขนถ่ายออกจากโรงเรียนทุกวันโดยไม่เหลือปริมาณมูลฝอยตกค้างภายในโรงเรียน สัดส่วนของมูลฝอยต่อจำนวนนักเรียนและบุคลากรของโรงเรียนเท่ากับ 0.072 กิโลกรัมต่อคนต่อวันซึ่งมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนมูลฝอยเฉลี่ยของประเทศซึ่งเท่ากับ 1.11 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) จึงไม่เกิดผลกระทบ (0) การกระจายของมูลฝอยไม่เกิดผลกระทบภายในโรงเรียน (0) เนื่องจากถึงแม้ว่ามูลฝอยที่พบภายในโรงเรียนจะมีการกระจายอยู่บริเวณ ห้องเรียน สนาม โรงอาหาร ห้องน้ำ และห้องพยาบาล แต่มูลฝอยจากสถานที่ต่างๆ ดังกล่าวจะถูกเก็บรวบรวมลงถังและขนย้ายมายัง จุดรวบรวมมูลฝอยของโรงเรียนและขนถ่ายออกจากโรงเรียนทุกวัน ดังแสดงผลการวิเคราะห์ผลกระทบของมูลฝอยภายในโรงเรียนใน Table 2

Table 2 The impact of solid waste in school

Topic	Impact analysis	Impact level
Kind of solid waste	Not found infection and hazardous waste	(0)
Quantity of solid waste	Not found solid waste residues in school	(0)
Proportion of solid waste	A very small proportion compared with the national average ratio of solid waste.	(0)
Distribution of solid waste	Collection and transportation solid waste from various locations to gathering point and move out from school every day.	(0)

ระดับของผลกระทบ (Impact level) 0 = ไม่เกิดผลกระทบ, ± 2 เกิดผลกระทบปานกลางใช้เทคโนโลยีระดับพื้นฐานแก้ไข, ± 3 เกิดผลกระทบระดับรุนแรงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการแก้ไข (เกษม, 2554)

การสร้างแนวทางการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียน

สร้างแนวทางการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียนด้วยการจัดสนทนากลุ่ม (focus group) กับนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 จำนวน 10 คน โดยนำเสนอผลการศึกษาชนิดและผลกระทบของมูลฝอยที่เกิดขึ้นภายในโรงเรียนและร่วมกันสนทนาในหัวข้อ"วิธีการในการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียน" ผลการศึกษาพบว่าถึงแม้มูลฝอยที่เกิดขึ้นภายในโรงเรียนจะไม่เกิดผลกระทบต่อโรงเรียน แต่กลุ่มตัวอย่างมีความเห็นว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการมูลฝอยของโรงเรียน ได้ทั้งสิ้น 6 วิธีคือ (1) นำกล่องนมมาทำกระเป๋า (2) ทิ้งขยะให้ลงถัง (3) นำขวดไปขาย (4) สิ่งประดิษฐ์จากวัสดุเหลือใช้ (5) นำเศษอาหารไปให้เป็นอาหารสัตว์ และ (6) คัดแยกขยะ

และเมื่อนำข้อคิดเห็นของนักเรียนตัวแทนที่ได้จากการสนทนากลุ่มมาสร้างแนวทางการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียน พบว่า แนวทางการจัดการมูลฝอยโดยการมีส่วนร่วมของนักเรียนประกอบไปด้วย 2 วิธีใหญ่ คือ (1) ลดปริมาณการเกิดมูลฝอยซึ่งเป็นวิธีการที่มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ เตือนจิต (2547) ในการจัดการมูลฝอยโดยการลดปริมาณมูลฝอยด้วยความพยายามในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของนักเรียน รวมทั้งยังสอดคล้องกับการศึกษาของ ภาณุวัติ (2551) ที่มีการจัดกิจกรรมการเข้าค่ายการคัดแยกมูลฝอยเพื่อลดปริมาณมูลฝอยของโรงเรียน และ (2) การเพิ่มมูลค่าของมูลฝอยซึ่งประกอบไปด้วย 4 กิจกรรมดังแสดงใน Table 3

Table 3 Solid waste management guidelines

Solid waste management guidelines	
Reducing solid waste activities	Adding solid waste value activities
1. Organized the campaign for screening solid waste before leave into the right bin.	1. Gathered plastic bottle and used paper for sale.
2. Contested the solid waste invention in school.	2. Collected food waste for animal feed.

อย่างไรก็ตามผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโรงเรียนมีรูปแบบในการจัดการขยะของโรงเรียนเป็นพื้นฐานอยู่แล้ว ดังนั้น แนวทางการศึกษาในอนาคตอาจเป็นการศึกษาระดับการมีส่วนร่วมของนักเรียนในกระบวนการจัดการขยะ เพื่อที่จะได้นำมาสังเคราะห์เป็นแนวทางการส่งเสริม หรือพัฒนา การมีส่วนร่วมของนักเรียนให้มากขึ้นต่อไป

สรุป

แนวทางการจัดการมูลฝอยภายในโรงเรียนโดยการมีส่วนร่วมของนักเรียนประกอบไปด้วย 2 แนวทางคือ คือการลดปริมาณการเกิดมูลฝอย และการเพิ่มมูลค่าของมูลฝอยซึ่งประกอบไปด้วย 4 กิจกรรมคือรณรงค์ประชาสัมพันธ์ให้มีการคัดแยกมูลฝอยตามประเภท และทิ้งมูลฝอยให้ลงถังที่เตรียมไว้ จัดการประกวดแข่งขันการทำสิ่งประดิษฐ์จากมูลฝอยระหว่างห้องเรียน รวบรวมมูลฝอยทั่วไปเช่นพลาสติก และกระดาษขาย และรวบรวมเศษอาหารไปขายเป็นอาหารสัตว์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงเรียนอนุบาลวัดพิชัยสงครามในการอนุเคราะห์สถานที่ศึกษาวิจัยและขอขอบคุณหลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวันสนับสนุนทุนและเวลาในการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2557. **(ร่าง) รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556**. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2558. **(ร่าง) แผนแม่บทการบริหารจัดการขยะมูลฝอยของประเทศ (พ.ศ. 2559 – 2564)**. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรงเทพฯ.

เกษม จันทร์แก้ว. 2546. **วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เกษม จันทร์แก้ว. 2554. **การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นสูง**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เตือนจิต สุดสวาท. 2547.**การศึกษาพฤติกรรมการจัดการขยะมูลฝอยของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนในเขตเทศบาล ตำบลท่าเรือพระแท่น อำเภอท่ามะกา จังหวัดกาญจนบุรี**.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารการศึกษา.มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ภานุวัติ ทองเจิม. 2551.**โปรแกรมสิ่งแวดล้อมศึกษาเพื่อการลดปริมาณขยะในโรงเรียนอนุบาลกำแพงแสน**.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วรางคณา วิเศษมณี. 2554. การพัฒนากระบวนการคัดแยกขยะในสถานศึกษา. **วารสารสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ** 3: 13-17.

วิทวัส โพธิลุขา. 2556. **การจัดการมูลฝอยในโรงเรียนอนุบาลขอนแก่น**. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มสธ 3: 3-13.

สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2554. **แผนยุทธศาสตร์การบริหารจัดการขยะมูลฝอยชุมชนระดับประเทศและแผนปฏิบัติการเพื่อจัดการมูลฝอยประเภท แก้ว กระดาษ พลาสติก และหลอดฟลูออเรสเซนต์**. บริษัทยูอีอี เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด. กรุงเทพ.

คุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย จากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งและรุ่นสองของพื้นที่ลุ่มน้ำเขตเงาฝน จังหวัดเพชรบุรี

Physical and Chemical Characteristics of Pineapple Fruit (Smooth Cayenne) Product from First and Second Ratoons Pineapple in Rain-shadow Watershed area, Phetchaburi Province

สายสุจิตร พูลสงวน* กิตติชัย ดวงมาลย์ และ อลงกรณ์ อินทรักษา

Saysujit Poolsangaun* Kittichai Duangmal and Alongkorn Intaraksa

บทคัดย่อ

การศึกษาการเปรียบเทียบสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียในหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง และหน่อสับปะรดรุ่นสอง ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะ 2 ประเภทคือ คุณลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ความสูง เส้นรอบวง น้ำหนัก จำนวนตา จำนวนใบ และปริมาณคลอโรฟิลด์ในใบ คุณลักษณะทางเคมี ได้แก่ ความหวาน (brix) ค่าไนเตรท (nitrate) ปริมาณกรด (acidity) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในพื้นที่ลุ่มน้ำพุสวรรค์ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี เมื่อทำการเปรียบเทียบผลผลิตสับปะรดกับค่ามาตรฐานที่โรงงานแปรรูปสับปะรดกระป๋อง พบว่าคุณลักษณะทางกายภาพจากผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองมีความเหมาะสมในการนำส่งเข้าโรงงานทั้งในปัจจัยขนาดเส้นรอบวง และปริมาณน้ำหนักผลสับปะรด ในขณะที่คุณลักษณะทางเคมีทั้งหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง และหน่อสับปะรดรุ่นสองมีความเหมาะสมในการนำส่งเข้าโรงงานในส่วนของค่าไนเตรท (nitrate) ปริมาณกรด (acidity) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) แต่ค่าความหวาน (brix) จากผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานโรงงานสับปะรดกระป๋องทั้งนี้อาจเนื่องมาจากดินบริเวณดังกล่าวได้ผ่านการใช้เพาะปลูกมาแล้วรอบหนึ่งดังนั้นเกษตรกรจึงต้องพิจารณาการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมเพื่อเพิ่มค่าความหวานในผลสับปะรด

ABSTRACT

Studied compared of pineapple fruit (Smooth Cayenne) in pineapple first ratoons and pineapple second ratoons, Studied characteristic two types of physical, height, weight, circumference, eye and left number, chlorophyll content in leaves. Chemical characteristic include sweetness (brix), nitrate, acidity and pH in Phusawan watersheds area, Kaengkrachan district, Phetchaburi province. When compared to the standard that is found in Pineapple processing plant, Physical characteristic in pineapple second ratoons are suitable for import into the factory in the circumference and weight of Pineapples. While the Chemical characteristic found in pineapple first ratoons and pineapple second ratoons are suitable for import into the factory of the nitrates, acidity and pH but the sweetness (brix) of Pineapple second ratoons less than the industrial standards, because of the soil in the area has been planted already around one, so farmers have to consider potassium fertilizer (K) to increase the sweetness (brix) of the Pineapples.

Key Words: Pineapple Ratoon, Chemical, Physical, Brix

*Corresponding author; e-mail address: Saysujit_p@hotmail.com

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ.งามวงศ์วาน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Science, Faculty of Environmental Science, Kasetsart University, 50 Ngomwongwan Road, Chatuchak, Bangkok 10900

คำนำ

สับปะรดพืชล้มลุกเป็นผลไม้เขตร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย และเป็นผลผลิตที่ใช้ในการแปรรูปเพื่อส่งออกในรูปแบบสำเร็จรูป กล่าวคือ สับปะรดเป็นพันธุ์ไม้ที่มีบทบาททั้งการบริโภคและการส่งออก โดยพันธุ์ที่มีเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตต่อสภาพแวดล้อมในประเทศไทยคือสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย การปลูกสับปะรดในลุ่มน้ำพุสวรรค์จัดเป็นกิจกรรมหลักในการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำ ทั้งนี้ด้วยปัจจัยที่เอื้ออำนวยอาทิ คุณลักษณะดิน (soil) ลักษณะภูมิอากาศ (climate) เป็นต้นปัจจัยดังกล่าวเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อคุณภาพภายใน และสัณฐานวิทยาของผลผลิตสับปะรดที่มีผลต่อการส่งแปรรูปเข้าโรงงานสับปะรดกระป๋อง (จารุพันธ์, 2526)

สับปะรด เป็นพืชที่มีการปลูกหนึ่งครั้งสามารถให้ผลผลิตได้จากหน่อในรุ่นต่อไปที่แตกออกจากตอต้นพ่อแม่พันธุ์ได้ 2-3 รุ่น แต่ผลผลิตของหน่อรุ่นต่อไปที่แตกออกจากตอพ่อแม่พันธุ์อาจส่งผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผลผลิตทำให้ไม่ได้ผลผลิตตามคุณภาพที่ทางโรงงานแปรรูปสับปะรดกระป๋องต้องการ หรือถ้าต้องการให้มีคุณภาพของผลผลิตได้ตามต้องการอาจต้องมีการบำรุงรักษาที่มากขึ้น จึงทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นตามไปด้วย (อังคณา, 2555) การศึกษาการเปรียบเทียบคุณลักษณะทางกายภาพได้แก่ ความสูง ขนาดโคนต้น จำนวนตา จำนวนใบ น้ำหนักผล เส้นรอบวงผล ปริมาณคลอโรฟิลด์ในใบสับปะรด และในด้านคุณลักษณะทางเคมีได้แก่ ค่าความหวาน (brix) ค่าไนเตรท (nitrate) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) และสภาพความเป็นกรด (acidity) วิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างทางลักษณะระหว่างผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง และผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสอง ทั้งนี้เพื่อศึกษาปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีที่มีผลต่อการส่งสับปะรดเข้าโรงงานแปรรูปสับปะรดกระป๋อง เนื่องจากสับปะรดเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย และนอกจากนั้นผลการศึกษาเป็นผลข้อมูลที่ใช้ในการแนะนำแนวทางการปลูกสับปะรดให้แก่เกษตรกรต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ และคุณลักษณะทางเคมีของผลผลิตสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียทำการเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งเป็นหน่อเจริญขึ้นมาจากบริเวณมุมใบและเจริญเติบโตขึ้นมาเป็นสับปะรดต้นใหม่พัฒนาขึ้นมากจากหน่อบนต้นแม่ และผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสองเป็นสับปะรดต้นใหม่ที่เกิดจากตาตามมุมใบของหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง (อังคณา, 2555) ทั้งนี้สับปะรดที่นำมาศึกษา เริ่มทำการปลูกในเดือนสิงหาคมปี 2556 เก็บผลผลิตในเดือนพฤศจิกายน 2558 พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในจุดที่ตั้งแปลงสับปะรดบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำพุสวรรค์ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี

ตัวอย่างผลผลิตหน่อสับปะรดทั้งสองรุ่นจะเก็บผลผลิตสับปะรดที่มีขนาดของหน่อที่ใกล้เคียงกันได้แก่ ขนาดน้ำหนัก 500 - 600 กรัม ความยาว 50 - 60 เซนติเมตร แต่มีความแตกต่างกันในเรื่องของอายุของหน่อสับปะรดรุ่นสองมีอายุประมาณ 2 ปีในขณะที่หน่อรุ่นหนึ่งมีอายุ 1 ปีครึ่ง และการสะสมของธาตุอาหารภายในหน่อสับปะรดอาทิ ไนโตรเจน (N) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) ในหน่อสับปะรดรุ่นสองมีการสะสมธาตุอาหารมาตั้งแต่หน่อสับปะรดรุ่นแรก ลักษณะของดินที่ใช้ในการปลูกสับปะรดเป็นดินร่วนปนทรายภายในดินมีธาตุอาหารที่ได้จากปุ๋ย 2 สูตร ได้แก่ สูตร 15-15-15 และสูตร 21-0-0 ด้วยระยะเวลา 2 ช่วง ครั้งที่ 1 สูตร 21-0-0 และ สูตร 15 -15-15 จำนวน 25 - 40 กรัมต่อต้นบริเวณโคนต้น ใส่หลังจากปลูกประมาณ 1 เดือน ครั้งที่ 2 สูตร 21-0-0 และสูตร 15-15-15 จำนวน 30 - 70 กรัมต่อต้นใส่หลังจากครั้งแรกประมาณ 5 – 7 เดือน

การเก็บตัวอย่าง และวิเคราะห์ตัวอย่าง

ลงสำรวจพื้นที่พร้อมเก็บตัวอย่างตามจุดที่กำหนด การเก็บตัวอย่างผลผลิตหน่อสับปะรดทั้งสองรุ่นอาศัยปัจจัยทิศด้านลาด (aspect) และความลาดชัน (slope) ในบริเวณพื้นที่จุดที่ตั้งแปลงสับปะรด ทั้งนี้ทำการสุ่มตัวอย่างทั้งหมด 72 ลูกจากพื้นที่ทั้งหมด 1 ไร่แบ่งเป็นผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง 36 ลูก และผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสอง 36 ลูก บนพื้นที่แปลงปลูกสับปะรดที่ได้กำหนดขนาดของหน่อสับปะรดดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น 1) คุณลักษณะทางกายภาพ คือการวิเคราะห์ปัจจัยในเชิงกายภาพได้แก่ ความสูงลำต้น ขนาดโคนลำต้น และเส้นรอบวงผลผลิตสับปะรดใช้สายวัดและตลับเมตรหน่วย (เซนติเมตร) ในการวัดคลอโรฟิลล์ในใบสับปะรดด้วยเครื่องวัดคลอโรฟิลด์รุ่น (minalta) หน่วยเป็นร้อยละ (%) น้ำหนักของผลสับปะรดด้วยตราชั่งหน่วย (กิโลกรัม) จำนวนใบสับปะรด และจำนวนตาสับปะรด 2) คุณลักษณะทางเคมี คือการวิเคราะห์ในเชิงเคมีโดยจะเน้นวิเคราะห์ภายในของผลสับปะรดได้แก่ ค่าความหวาน (brix) โดยการใช้เครื่อง hand refractometer การวัดค่าไนเตรทด้วยกระดาษทดสอบไนเตรท หาความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยการนำน้ำสับปะรดที่คั้นมาวัดด้วย pH meter และการวัดค่าความเป็นกรด (acidity) จากวิธีการ tritratable acidity (TA) โดยนำน้ำคั้นสับปะรดมาไตเตรทกับ NaoH แล้วคำนวณหา (%) ตามวิธีการของ ภานุพงษ์ และคณะ (2557) การวิเคราะห์ตัวอย่างผลผลิตทางกายภาพ และทางเคมีจากผลผลิตหน่อสับปะรดทั้งสองรุ่นด้วยวิธีการทดสอบความแตกต่างทางสถิติข้อมูลระหว่างค่าเฉลี่ยทั้งสองกลุ่มที่เป็นอิสระต่อกันผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างทั้ง 72 ตัวอย่างในแต่ละปัจจัยนำมาหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และหาความแตกต่างกันทางสถิติด้วยการทดสอบ (T-test) แบบ dependent (Huck et al., 1974) และนำเปรียบเทียบปัจจัยคุณลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของผลผลิตสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียในผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง และผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสอง ทั้งนี้เพื่อหาความเหมาะสมของผลผลิตสับปะรดที่มีความเหมาะสมในการส่งเข้าโรงงานสับปะรดกระป๋อง

ผลและวิจารณ์

พื้นที่ลุ่มน้ำพุสวรรค์มีการใช้ที่ดินประเภทเกษตรกรรมหลักคือ การปลูกสับปะรด ทั้งนี้เนื่องด้วยความเอื้ออำนวยในด้านสภาพแวดล้อมปัจจัยด้านลักษณะดิน (soil) ลักษณะภูมิอากาศ (climate) เป็นต้น จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลผลิตสับปะรดโดยการเก็บตัวอย่างสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียจำนวน 72 ลูกโดยทำการเปรียบเทียบคุณภาพผลผลิตสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง และผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสอง สามารถอธิบายความแตกต่างได้เป็น 2 ลักษณะได้แก่ คุณลักษณะทางกายภาพ และคุณลักษณะทางเคมีดังนี้

คุณลักษณะทางกายภาพ

ความสูงและความกว้างของลำต้น สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียเป็นสายพันธุ์ที่มีความสามารถเข้ากับสภาพแวดล้อมที่แห้งแล้งได้ดี ลักษณะของความสูงและความกว้างบ่งบอกได้ถึงคุณภาพ และขนาดของผลสับปะรด (ประธาน, 2544) จากการศึกษาค่าเฉลี่ยความแตกต่างทางสถิติความสูงของลำต้นพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยที่ผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งมีความสูงเฉลี่ยที่ 78 เซนติเมตร ผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสองมีความสูงเฉลี่ย 71 เซนติเมตร (Table 1) ผลดังกล่าวมาจากหน่อสับปะรดรุ่นสองมีการสูญเสียธาตุไนโตรเจน (N) จำนวนหนึ่งจากการติดไปกับผลผลิตของสับปะรด และในกรณีดินที่ปลูกสับปะรดมีปริมาณไนโตรเจน (N) ไม่เพียงพอ นอกจากนั้นคุณสมบัติการระบายน้ำได้ดีของดินร่วนปน

ทรายมักจะเป็นผลให้มีการสูญเสียธาตุไนโตรเจน (N) และธาตุอาหารอื่นๆ ไปพร้อมกับน้ำที่ชะล้างหน้าดิน (อังคณา, 2555) ในทางตรงกันข้ามค่าเฉลี่ยทางสถิติของความกว้างลำต้นที่วัดจากขนาดโคนต้นเมื่อเปรียบเทียบผลผลิตหน่อสับปะรดทั้งสองรุ่นแล้วพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เนื่องจาก P มีค่า 0.004 (Table 1) โดยค่าเฉลี่ยของความกว้างลำต้นผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งและผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองมีความกว้างเฉลี่ยอยู่ที่ 26 และ 27 เซนติเมตร (Table 1) หรืออาจกล่าวได้ว่าผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองมีการเจริญเติบโตออกทางด้านข้างมากกว่าผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง

ขนาดและน้ำหนักของผลสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียในพื้นที่ลุ่มน้ำพุสวรรค์เกษตรกรจะนิยมเก็บผลผลิตเพื่อส่งเข้าโรงงานสับปะรดกระป๋อง ในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ขนาดสับปะรดที่เป็นขนาดมาตรฐานของโรงงานขนาดเส้นรอบวงจะอยู่ที่ 20 - 30 เซนติเมตรเพื่อความเหมาะสมในการบรรจุลงกระป๋อง น้ำหนักผลที่เหมาะสมที่สุดควรอยู่ในช่วง 1.0 - 1.5 กิโลกรัม (จิราพรรณ, 2548) จากการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยทางสถิติของขนาดของเส้นรอบวงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งมีค่าเฉลี่ยเส้นรอบวงที่ 28 เซนติเมตร ผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองมีค่าเฉลี่ยเส้นรอบวงที่ 33 เซนติเมตร (Table 1) ในขณะที่ค่าเฉลี่ยทางสถิติของน้ำหนักผลสับปะรดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เนื่องจาก P มีค่า 0.035 (Table 1) ผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักผลที่ 0.94 กิโลกรัมผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักผลที่ 1.09 กิโลกรัม (Table 1) เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานโรงงานสับปะรดกระป๋องพบว่าขนาดเส้นรอบวงในผลผลิตหน่อสับปะรดทั้งสองรุ่นสามารถส่งเข้าโรงงานสับปะรดกระป๋องได้ ส่วนค่าเฉลี่ยของน้ำหนักของผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งไม่เหมาะสมต่อการส่งเข้าโรงงานสับปะรดกระป๋อง อาจจะเป็นผลมาจากผลผลิตในหน่อสับปะรดรุ่นสองมีการสะสมธาตุโพแทสเซียม (K) ที่สำคัญต่อการสร้างอาหารไว้ในหน่อบางส่วนมาตั้งแต่การปลูกในครั้งแรกเมื่อนำมาปลูกอีกครั้งทำให้ผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองสามารถสร้างอาหารได้มากขึ้นเช่นเดียวกับ ภานุพงษ์ และคณะ (2557); Quaggio *et al.* (2002) พบว่าธาตุโพแทสเซียม (K) ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสับปะรดแต่ส่งผลต่อขนาด และสามารถเพิ่มน้ำหนักของผลผลิตได้

จำนวนใบและปริมาณคลอโรฟิลล์ สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียมีจำนวนใบมากที่สุดเมื่อเทียบกับสับปะรดพันธุ์อื่นใบของสับปะรดเป็นตัวกำหนดการเกิดหน่อเนื่องจากหน่อสับปะรดจะเกิดตามมุมใบ ความแตกต่างของผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งและผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสองอยู่ที่การกำเนิดของหน่อในหน่อสับปะรดรุ่นสองจะเกิดจากสับปะรดต้นใหม่จากตาตามมุมใบของหน่อรุ่นหนึ่ง (ประธาน, 2544) ทั้งนี้ปัจจัยในด้านสภาพแวดล้อมจะเป็นตัวเอื้ออำนวยจำนวนใบสับปะรด จากการศึกษาค่าเฉลี่ยทางสถิติของจำนวนใบ และปริมาณคลอโรฟิลด์ในใบสับปะรดพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) จำนวนใบของผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งและจากผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองอยู่ที่ 35 และ 36 ใบ (Table 1) และค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลด์ในใบอยู่ที่ 71.3 % และ 71.7 % (Table 1) Radha and Chadh (1992) กล่าวว่า ระดับธาตุอาหารหลัก (N P K) ในหน่อของสับปะรดทั้งสองรุ่นต้องมีปริมาณที่เพียงพอ โดยเฉพาะธาตุโพแทสเซียม (K) มีความสำคัญต่อการสังเคราะห์แสง สอดคล้องกับ ภานุพงษ์ และคณะ (2557); พิทยา (2554) ธาตุโพแทสเซียม (K) มีส่วนช่วยในการสังเคราะห์แสงช่วยเคลื่อนย้ายน้ำตาลจากใบไปผลผลิต สับปะรดที่มีใบมากส่งผลต่อการเกิดดอกในต้นสับปะรด ลักษณะของใบที่มีสีเขียวจัดเกิดจากการรับแสงของพืชเพื่อนำมาสร้าง และสะสมของอาหาร

ปริมาณของคลอโรฟิลด์ที่สูงกว่าเล็กน้อยในผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองอาจจะสามารถผลิตอาหารได้ดีกว่าทำให้คุณลักษณะทางกายภาพหน่อสับปะรดรุ่นสองในขนาดของลำต้นดีกว่าหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง

จำนวนตา ผลสับปะรดเกิดขึ้นจากรังไข่ที่เจริญขึ้นมาแทนตัว 1 ตา กล่าวคือใน 1 ตาของสับปะรดลูกหนึ่งจะอุดมด้วยสารอาหารที่ดูดซึมมากจากลำต้นที่รับธาตุอาหารจากการสะสมในดินที่ปลูก และการสะสมในหน่อสับปะรด จำนวนตาในผลสับปะรดมีความสัมพันธ์ต่อคุณภาพทางเคมีภายในสับปะรดโดยเฉพาะความหวาน จากการศึกษาค่าเฉลี่ยทางสถิติพบว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนตาในผลผลิตหน่อสับปะรดทั้งสองรุ่นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เนื่องจาก P มีค่า 0.005 (Table 1) โดยค่าเฉลี่ยผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งอยู่ที่ 70 ตา และในค่าเฉลี่ยผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองอยู่ที่ 81 ตา (Table 1) การคัดเลือกสับปะรดที่ส่งเข้าโรงงานทางโรงงานจะพิจารณาจำนวนตาสับปะรดเพื่อดูความสุก และความหวานในผลสับปะรดกล่าวคือ จำนวนตา 2 - 6 ตาที่เป็นสีเหลืองถือว่าลูกนั้นมีความสุกแล้วร้อยละ 50 (จินดารัฐ, 2541)

Table 1 Average physical of pineapple first and second ratoons.

Factor	Pineapple first ratoons	Pineapple second ratoons	Factory standard*	P value
Stump height	78 cm	71 cm	-	2.906
Stump size	25 cm	27 cm	-	0.004
Fruit weight	0.94 kg	1.09 kg	1 – 1.5 kg	0.035
Circumference	28 cm	33 cm	20-30 cm	1.011
Pineapple eyes	70 eyes	81 eyes	-	0.005
leaves	35 leaves	36 leaves	-	0.505
Chlorophyll in the leaves	71.3 %	71.7%	-	0.890

Remark: *Jiraphan (2548)

คุณลักษณะทางเคมี

ค่าความหวาน (brix) ลักษณะความหวานของสับปะรดที่โรงงานรับซื้อจะต้องมีความสุกปานกลางไม่มีกลิ่นส่าเหล้าเปอร์เซ็นต์ค่าความหวานสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาลในผลผลิต ดังนั้นธาตุอาหารในหน่อสับปะรดจึงมีผลอย่างมากธาตุอาหารหลักโดยเฉพาะโพแทสเซียม (K) เป็นธาตุที่มีผลต่อคุณภาพชัดเจนกว่าธาตุอื่นๆ ทั้งนี้เพราะโพแทสเซียม (K) เนื่องจากเป็นธาตุอาหารหลักมีบทบาทที่สำคัญต่อการสร้างและการเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาล การใส่ปุ๋ยให้ได้รับโพแทสเซียมอย่างเพียงพอทำให้มีการสะสมน้ำตาลในผลเกิดขึ้นได้เต็มที่ และทำให้สับปะรดมีความหวานตามธรรมชาติ (พิทยา, 2554) จากการศึกษาค่าเฉลี่ยทางสถิติของเปอร์เซ็นต์ของความหวาน (brix) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งและผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสองมีระดับค่าเฉลี่ยความหวาน (brix) อยู่ที่ร้อยละ 12 และร้อยละ 9 ตามลำดับ (Table 2) เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งมีปริมาณความหวานเหมาะสมแก่การส่งโรงงานตามมาตรฐานที่ต้องไม่เกินร้อยละ 12 - 14 (จารุพันธ์, 2526) แต่ในผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสองมีค่าเฉลี่ยความหวานต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานคือร้อยละ 9 อาจเกิดจากการที่ดินมีปริมาณธาตุโพแทสเซียม (K) ต่ำ

ดังนั้นเกษตรกรจึงควรพิจารณาเพิ่มธาตุโพแทสเซียม (K) ในปุ๋ยให้มากขึ้นเพราะโพแทสเซียม (K) มีหน้าที่สำคัญในการสร้างและการเคลื่อนย้ายน้ำตาลในพืช สัมพันธ์กับ อดิศักดิ์ และจินดา (2549) การเกิดความหวานในสับปะรดนั้นมีความสัมพันธ์กับการสะสมน้ำตาลในผลผลิตโดยเฉพาะช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว การจัดการปุ๋ยโพแทสเซียม (K) อย่างเหมาะสมในระยะหลังติดผลจะช่วยเพิ่มขนาดและคุณภาพของผลผลิตโดยเฉพาะความหวานในผลผลิตได้ (พิทยา, 2554)

ค่าไนเตรท (nitrate) เป็นสารตกค้างในสับปะรดที่เก็บเกี่ยวจากแปลงปลูก ความสัมพันธ์ของปริมาณไนเตรทมีผลต่อการส่งเข้าโรงงานแปรรูป เนื่องจากค่าไนเตรทในผลผลิตจะกัดกร่อนสารเคลือบกระป๋องซึ่งทำให้กระป๋องดำ ทางโรงงานได้กำหนดไว้ให้สารไนเตรทในผลผลิตสับปะรดไม่เกิน 25 ppm (จารุพันธ์, 2526) จากการศึกษาค่าเฉลี่ยทางสถิติของปริมาณไนเตรทพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ค่าเฉลี่ยของผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งและผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสองพบค่าไนเตรทโดยเฉลี่ยที่ 11 ppm และ 12 ppm ตามลำดับ (Table 2) ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานโรงงานกำหนดไว้ ไนเตรทที่ตกค้างในผลผลิตเกิดขึ้นจากการใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณมากจากการฉีดพ่นของเกษตรกร และการรับปุ๋ยที่ผสมธาตุไนโตรเจน (N) มากจากการสะสมค้างในดินและปุ๋ยที่ได้รับจากการปลูกสับปะรด นอกจากนั้นยังได้รับสารไนโตรเจนจากฝนโดยตรง (เจริญศักดิ์ และคณะ, 2537)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีผลต่อความหวานในสับปะรด เนื่องจากความหวานจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักผลเพิ่มขึ้นและปริมาณความเป็นกรดต่ำ (Paull and Chen, 2001) ค่ามาตรฐานโรงงานสับปะรดกระป๋องความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในสับปะรดอยู่ที่ 3.5 - 4 (จารุพันธ์, 2526) การศึกษาค่าเฉลี่ยทางสถิติของปริมาณความเป็นกรด-ด่าง (pH) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.72 และ ผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองมีค่าเฉลี่ยที่ 3.70 (Table 2) ซึ่งมีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อยแต่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานโรงงานสับปะรดกระป๋อง

ค่าปริมาณกรด (acidity) ปริมาณกรดในผลสับปะรดหาได้จากการ titratable acidity (TA) เพื่อหาความเป็นกรดในน้ำสับปะรดโดยสภาพความเป็นกรดที่โรงงานต้องการต้องไม่เกิน 20/100 ml ทั้งนี้สภาพความเป็นกรดมีความสัมพันธ์ต่อคุณภาพของสับปะรดที่บรรจุลงกระป๋องหากสับปะรดมีค่าความเป็นกรดมากจะมีฤทธิ์กัดกร่อนกระป๋องและทำให้กระป๋องเสื่อมคุณภาพรวดเร็วขึ้น (จารุพันธ์, 2526) จากการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยทางสถิติของปริมาณกรดพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งมีค่าเฉลี่ยปริมาณกรดที่ 12.5 % และผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองมีค่าเฉลี่ยปริมาณกรดที่ 16.4 % ในกรณีที่ปริมาณกรดในผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งน้อยกว่าผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นสองเพราะผลผลิตหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งมีความหวานมากจึงเป็นผลให้ปริมาณกรดลดลง (Soler, 1994) ปริมาณกรดเกิดขึ้นจากต้นสับปะรดดูดซับธาตุอาหารภายในดิน และจากการสะสมในหน่อสับปะรดโดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน (N) นอกจากนั้นอิทธิพลของสภาพอากาศ แสงแดด อุณหภูมิมีผลต่อคุณภาพของสับปะรดส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพสับปะรด (จินดารัฐ, 2541) การใส่ปุ๋ยธาตุไนโตรเจน (N) และปุ๋ยโพแทสเซียม (K) ในสัดส่วนที่เหมาะสมเป็นทางแก้ไขปัญหาปริมาณกรดภายในผลสับปะรดที่สูงได้โดยกำหนดให้ (N : K ประมาณ 3 : 4) ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการเจริญเติบโตทางลำต้น ใบ และขนาดของผลสับปะรดส่งผลต่อคุณภาพโดยเฉพาะปริมาณกรด และน้ำตาลในผลผลิต (จิราพรรณ, 2548)

Table 2 Average Chemical of pineapple first and second ratoons.

Factor	Pineapple first ratoons	Pineapple second ratoons	Factory standard*	P value
Brix	12 %	9 %	12 – 14 %	2.329
Nitrate	11 ppm	12 ppm	less than 25 ppm	0.711
Acidity	12.5 %	16.4 %	less than 20 %	9.421
pH	3.72	3.70	3.5 – 4	0.876

Remark: *Jaruphan (2526)

สรุป

การเปรียบเทียบความแตกต่างของคุณลักษณะทางกายภาพ และคุณลักษณะทางเคมีของผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่งและผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสองที่มีความเหมาะสมต่อการส่งเข้าโรงงานสับปะรดกระป๋อง ของผลผลิตหน่อสับปะรดทั้งสองรุ่นพบว่า ผลทางคุณลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ความสูงลำต้น เส้นรอบวง จำนวนใบ และปริมาณคลอโรฟิลด์ในใบมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ปริมาณของน้ำหนักผล และจำนวนตามีความแตกต่างกันโดยศึกษาค่าเฉลี่ยทางสถิติ (T - test) เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานโรงงานสับปะรดกระป๋องพบว่าผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นสองมีความเหมาะสมในการส่งเข้าโรงงานสับปะรดกระป๋องมากกว่าผลผลิตจากหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง หน่อสับปะรดทั้งสองรุ่นปลูกในลักษณะดินร่วนปนทราย มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกันและรับปุ๋ยสูตรเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกันที่หน่อสับปะรดรุ่นสองมีธาตุอาหารสะสมภายในหน่อมากกว่าหน่อสับปะรดรุ่นหนึ่ง ในขณะที่ค่าเฉลี่ยทางสถิติของคุณลักษณะทางเคมีปัจจัยความหวาน ค่าไนเตรท ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณกรดพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติและมีความเหมาะสมต่อการส่งโรงงานสับปะรดกระป๋อง แม้ว่าค่าเฉลี่ยความหวานในหน่อสับปะรดรุ่นสองจะต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานโรงงานสับปะรด ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการใส่ปุ๋ย และการดูแลรักษาจึงควรพิจารณาโดยเพิ่มปริมาณของธาตุโพแทสเซียม (K) ที่ส่งผลต่อคุณภาพความหวานสับปะรดให้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก สำนักงานทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์ มูลนิธิชัยพัฒนา และโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการสนับสนุนการเก็บข้อมูลวิจัย และขอบคุณหน่วยงานต่างๆ ที่ช่วยสนับสนุนข้อมูลประกอบในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จารุพันธ์ ทองแถม. 2526. **สับปะรดและอุตสาหกรรมสับปะรดในประเทศไทย**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

จิราพรรณ คล้ายกิจจา. 2548. **สับปะรด**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์เกษตรสยามบุ๊ค, กรุงเทพฯ.

จินดารัฐ วีระวุฒิ. 2541. **สับปะรดและสรีระวิทยาการเจริญเติบโตของสับปะรด**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฎ์, ชาญวิทย์ ทรัพย์แสนยากร, ชัชวาลย์ เปาทอง, เอ็จ สโรบล, จีระเดช แจ่มสว่าง, วิจารณ์ วิชชุกิจ และ ธีรวัฒน์ กษิรวัตน์. 2537. **ความแปรปรวนและการคัดเลือกในสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย**. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 โครงการพัฒนาเพิ่มพันธุ์และเพิ่มผลผลิตสับปะรด. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประธาน โพธิ์สวัสดิ์. 2544. **การศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและคุณภาพผลผลิตของสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียและพันธุ์ลูกผสม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิทยา สรวมศิริ. 2554. **ธาตุอาหารในดินการผลิตพืชสวน**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ภานุพงษ์ เป็งริน สันติ ช่างเจรจา ยุทธนา เขาสุเมรุ ปริญญาวดี ศรีตนทิพย์ และชิติ ศรีตนทิพย์. 2557. ผลของปุ๋ยโพแทสเซียมต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลผลิตและการเกิดเนื้อฉ่ำของสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย. **วารสารวิชาการวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร**. 31 (2): 33-47.

อดิศักดิ์ จูมวงษ์ และ จินดา ศรศรีวิชัย. 2548. ผลของอายุการเก็บเกี่ยวต่อความฉ่ำและคุณภาพสับปะรดทางเคมีของผลสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**. 37 (พิเศษ): 152-155.

อังคณา สุวรรณกูฏ. 2555. **เป็นไม่เป็นสับปะรด**. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

Chen, C.C. and R.E. Paull. 2001. Fruit temperature and crown removal on the occurrence of pineapple fruit translucency. **Scientia Horticulturae**. 88 : 85-95.

Huck, S.W., W. H. Cormier and W. G. JR. Bounds. 1974. **Reading Statistics and Research**. Harper & Row, Publishers Inc., New York.

Quaggio, J.A., D.J. Mattos, H. Cantarella, E.L.E. Almeida and S.A.B. Cardoso. 2002. Lewmon yield and fruit quality affected by NPK fertilization. **Scientia Horticulturae** 96 (1): 151-162.

Radha T., and K.L. Chadha. 1992. Influence of plant densities and applied nitrogen on the leaf area production of 'Kew' pineapple. **J.Hort**. 49 (3) : 245-248.

Soler, A. 1994. Enzymatic characterization of stress induce translucence of pineapple flesh in the Ivory Coast. **Acta Horticulturae** : 295-304.

ประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ

The Efficiency and Economic Value the Substance Changes State Solar Collector

นริศรา ละอองเอก **สกุลรัตน์ คำมูล*** และสุพินดา จ้ำหนองโพธิ์

Narisara Laongek **Sakulrat Kummool*** and Supinda Jumnongpo

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาลักษณะทางกายภาพของสมุนไพร สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้ง ออกแบบ สร้าง ทดลอง และศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพ พบว่า ข่า ไพล ขมิ้น ขิง และใบหม่อน มีความชื้น 380.79, 273.95, 415.88, 383.63 และ 234.91 % (M_d) ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ฯ พบว่า ข่า M_d = - 8.36t + 380 ไพล M_d = - 4t + 274 ขมิ้น M_d = - 5.8t + 416 ขิง M_d = - 5.5t + 384 และใบหม่อน M_d = - 11.25t + 210 จากการออกแบบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแบบแผ่นเรียบ ภายในบรรจุสสารเปลี่ยนสถานะ พบว่ามวลมีผลต่อการเก็บความร้อนและสามารถเก็บความร้อนได้ 8 - 11 ชั่วโมง อุณหภูมิ 32 - 40 ºC ประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า การกักเก็บความร้อน 204.40 MJ, η_c=48.07 % ค่าใช้จ่ายคงที่ 16,969 บาท/ปี ค่าใช้จ่ายแปรผัน 121,500 บาท/ปี จุดคุ้มทุน 274 กิโลกรัม และระยะเวลาคืนทุน 72 วัน

ABSTRACT

This research aims were to study the physical characteristics of the herbs, the mathematical model to predict drying, the designs, build, trial and study efficiency and economic value. The study of physical characteristics of galangal, pylos, turmeric, ginger and mulberry leaves found of the moisture content is 380.79, 273.95, 415.88, 383.63 and 234.91 % (M_d) respectively. The mathematical model of galangal is M_d = - 8.36t + 380, pylos is M_d = - 4t + 274, turmeric is M_d = - 5.8t + 416, ginger is M_d = - 5.5t + 384 and mulberry leaves is M_d = - 11.25t + 210. From the flat plate solar collector design within the contains substance changes state find mass effect heat retention and can retain heat 8 - 11 hours. The temperature 32 - 40 ºC. The efficiency and economic value find heat retention is 204.40 MJ, η_c = 33.16 %, Fixed Costs is 16,969 Baht/year, Variable Costs is 121,500 Baht/year, Break Even Point is 274 kilogram and Pay Back Period is 72 day

Key Words: mathematical model, economic value, heat retention

* Corresponding author; e-mail address: mindone123@hotmail.com

ภาควิชาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรสภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 40000

Department of Post-Harvest Processing Engineering, Faculty of Engineer, Rajamangala University of Technology ISAN Khonkean Campus 40000

คำนำ

ปัจจุบันเกิดการตื่นตัวในการนำสมุนไพรมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพในรูปแบบต่างๆ ซึ่งผลิตผลทางการเกษตรส่วนใหญ่ถูกทำให้แห้ง โดยวิธีการตากแดด แต่ในบางครั้งประสบปัญหาผลิตผลเปียกชื้น และไม่สามารถทำให้แห้งทันเวลา ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้เครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ น่าสนใจ เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ได้เปล่า สะอาด ปราศจากมลภาวะ และประเทศไทยมีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี โดยมีค่าพลังงานประมาณ 17 MJ/m^2.d ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอในการทำอุณหภูมิ 50 - 60 ºC โดย จารุวัฒน์ (2557) รายงานว่า เครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์มี 2 แบบ ได้แก่ แบบไหลเวียนตามธรรมชาติ (Passive Solar Dryer) และระบบอบแห้งแบบไหลเวียนตามธรรมชาติ (Passive Solar Drying System) ซึ่งนิยมใช้ในกลุ่มเกษตรกร เนื่องจากดูแลรักษาง่าย เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน และเป็นระบบที่ไม่อาศัยพลังงานอย่างอื่นในการพาความร้อนและขับเคลื่อนอากาศ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิดังกล่าวจะเกิดขึ้นเฉพาะเวลาที่มีแสงแดดเท่านั้น ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเพื่อเพิ่มระยะเวลาการทำงานของเครื่องอบแห้งให้มีระยะเวลาการทำงานที่มากขึ้นเมื่อไม่มีแสงอาทิตย์ โดยใช้พลังงานความร้อนจากสสารเปลี่ยนสถานะ โดยบรรจุในแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น

โดยการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของสมุนไพร เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแผงรับ และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้ง ออกแบบ และได้ศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะที่ได้สร้างขึ้นด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

ศึกษาลักษณะทางกายภาพของสมุนไพร

นำสมุนไพรวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความกว้าง และความยาว ด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี (Minolta Camera, ผลิตโดยประเทศญี่ปุ่น) แล้วนำสมุนไพรเข้าเครื่องอบแห้งสุญญากาศ 105 ºC 12 ชั่วโมง คำนวณปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก และมาตรฐานแห้งตามวิธีของ ASTM Standard. D3173 (1997) ดังสมการที่ 1

$$M_W = \left[\frac{W-d}{W}\right] \times 100 \qquad \text{และ} \qquad M_d = \left[\frac{W-d}{d}\right] \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ

M_w = ความชื้นมาตรฐานเปียก, %

M_d = ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %

W = มวลเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, kg

d = มวลแห้งผลิตภัณฑ์, kg

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้ง

นำสมุนไพรอบในตู้อบแห้งสุญญากาศ 40, 45 และ 50 °C ชั่งน้ำหนักทุกๆ ชั่วโมง จำนวน 8 ชั่วโมง คำนวณความชื้นมาตรฐานเปียก และมาตรฐานแห้ง และนำค่าเฉลี่ยมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการอบ จากกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จึงเลือกใช้สมการเส้นตรง โดยใช้วิธีวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis)

ออกแบบ สร้าง และทดลองแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ

การศึกษาครั้งนี้ได้ออกแบบแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ โดยจะเลือกใช้แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) ซึ่งมีส่วนประกอบ ดัง figure 1 โดยสามารถทำอุณหภูมิได้ประมาณ 80 - 90 °C ไม่ยุ่งยากในการใช้งาน ดูแลบำรุงรักษาง่าย สามารถใช้ได้ทุกๆ สถานที่

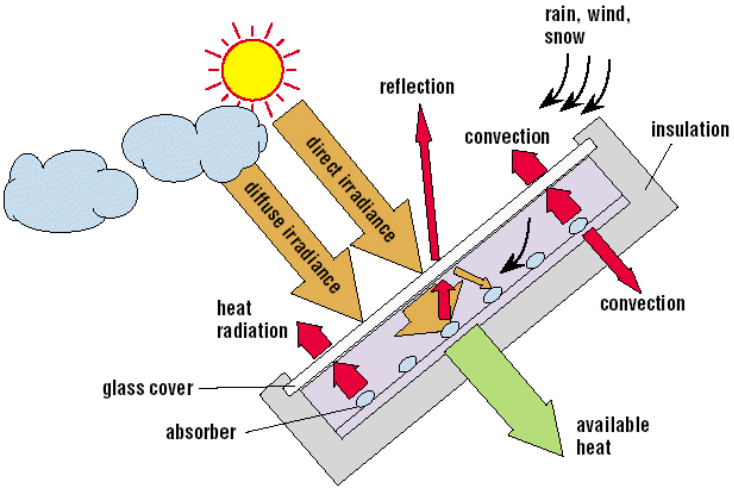


Figure 1 Flat Plate Solar Collector (Quaschning, 2004)

สสารเปลี่ยนสถานะหรือวัสดุกักเก็บความร้อนเลือกใช้ขี้ผึ้ง (Beeswax) โดยบรรจุภาชนะ 2 ขนาด ได้แก่ ขนาด 5 กิโลกรัมและ 1 กิโลกรัม นำเข้าตู้อบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C เวลา 8 ชั่วโมง และนำออกจากตู้อบแห้งสุญญากาศแล้วบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 10 นาที จนอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เพื่อศึกษาระยะเวลาในการกักเก็บความร้อนของขี้ผึ้ง สำหรับระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เลือกใช้แบบ Passive Solar Dryer และแบบ Passive Solar Drying System โดยมีองค์ประกอบต่าง ๆ ของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ ดัง figure 2

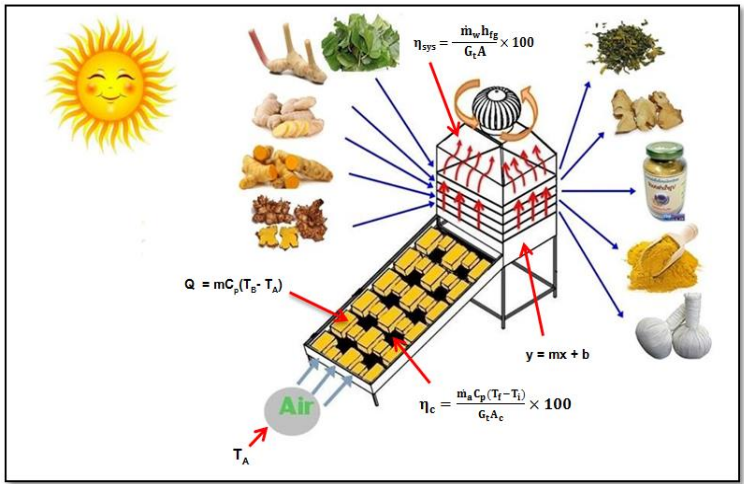


Figure 2 Substance Changes State for Flat Plate Solar Collector and Solar.

ศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ

นำสมุนไพรเข้าตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และตรวจวัด T_A, T_B , T_i, T_f และ G_t ทุก ๆ ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ในการคำนวณทฤษฎีการกักเก็บความร้อน (Cengel and Boles, 1998) ดังสมการที่ 2 และประสิทธิภาพแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ (Rabl, 1985) ดังสมการที่ 3

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_B - T_A) \quad (2)$$

เมื่อ

$\dot{Q}$ = ปริมาณความร้อนที่วัสดุถ่ายเท, kJ
$\dot{m}$ = มวลของวัสดุ, kg
C_p = ความจุความร้อนของวัสดุ, kJ/kg.K
T_B = อุณหภูมิของวัสดุกักเก็บความร้อน, K
T_A = อุณหภูมิของอากาศ, K

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_a C_p(T_f - T_i)}{G_t A_c} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

η_c = ประสิทธิภาพตัวรับรังสีดวงอาทิตย์, %
$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
C_p = ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg.K
T_i = อุณหภูมิเริ่มต้น, K
T_f = อุณหภูมิสุดท้าย, K
G_t = รังสีดวงอาทิตย์, kW/m^2
A_c = พื้นที่ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์, m^2

วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จากการประเมินผลแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ โดยการหา ค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed Costs), ต้นทุนแปรผัน (Variable Costs), จุดคุ้มทุน (Break Even Point) และ ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period) ตามวิธีของ วินิต (2546) ดังสมการที่ 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ

$$\text{Fixed Costs} = \text{Price Machine} + \text{Depreciation} + \text{Interest Tax.} \quad (4)$$

$$\text{Variable costs} = \text{Wage} + \text{Maintenance Costs} \quad (5)$$

$$\text{Break Even Point} = \frac{\text{Fixed Costs}}{\text{Wage-}\left[\frac{\text{Variable costs}}{\text{Price Machine}}\right]} \quad (6)$$

$$\text{Pay Back Period} = \frac{\text{Fixed Costs}}{\text{Profit}} \quad (7)$$

ผลและวิจารณ์

ลักษณะทางกายภาพของสมุนไพร

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของสมุนไพร พบว่า ข่า ไพล ขมิ้น ขิง และใบหม่อน มีรูปร่างและขนาดขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของพื้นที่เพาะปลูกนั้นๆ โดย มีค่าสีอยู่ที่ L = 54.95, a = +7.77, b = +32.72; L = 51.05, a = +9.06, b = +25.24; L = 49.39, a = +12.26, b = +24.08; L = 57.71, a = +9.01, b = +26.24 และ L = 37.78, a = -4.30, b = +17.20 ตามลำดับ และความชื้นอยู่ในช่วง 79.13, 73.48, 79.64, 79.21 และ 69.85 % (M_w) ตามลำดับ และ 380.79, 273.95, 415.88, 383.63 และ 234.91 % (M_d) ตามลำดับ (Table 1)

Table 1 The Physical Characteristics of Herbs.

Herbs	Size (cm)			Weight	Color Value			Moisture (%)	
	Diameter	Width	Length	(g)	L	a	b	M_w	M_d
Galangal	3.12	-	8.61	50.01	54.95	+7.77	+32.72	79.13	380.79
Pylos	4.52	-	9.50	22.65	51.05	+9.06	+25.24	73.48	273.95
Turmeric	1.69	-	8.54	17.50	49.39	+12.26	+24.08	79.64	415.88
Ginger	3.75	-	6.67	45.89	57.71	+9.01	+26.24	79.21	383.63
Mulberry	-	14.46	22.60	3.09	37.78	-4.30	+17.20	69.85	234.91

แบบจำลองทาคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้ง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความชื้นของสมุนไพรกับเวลาในการอบ ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายการอบแห้งสมุนไพรในแต่ละชนิด ดังนี้ ใบหม่อน M_w = - 2.36 t + 69.0 หรือ M_d = - 11.25 t + 210 ข่า M_w = - 0.38 t + 79.1 หรือ M_d = - 8.36 t + 380 ไพล M_w = - 0.33 t + 73.0 หรือ M_d = - 4.00 t +

274 ขมิ้น M_w = - 0.21 t + 82.6 หรือ M_d = - 5.80 t + 416 และ ขิง M_w = - 0.22 t + 80.6 หรือ M_d = - 5.50 t + 384

การสร้างและทดลองแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ Flat Plate Solar Collector and Solar Dryer

Flat Plate Solar Collector มีความกว้าง ความยาว และความสูงเท่ากับ 100, 200 และ 14 ซม. ตามลำดับ ทำมุมกับพื้น 17° ปิดด้วยกระจกใสชั้นเดียวหนา 6 มม. ด้านบน ด้านข้างทั้งสองข้าง ปิดด้วยกระจกใสหนา 6 มม. และด้านล่างปิดด้วยสมาร์ทบอร์ดรองด้วยโฟมหนา 19 มม. ปิดทับด้วยสมาร์ทบอร์ด และแผ่นเหล็กหนา 2 มม. Substance Change State นำกระป๋องสีดำบรรจุขี้ผึ้งและเศษเหล็ก ขนาด 1 กก. และ 5 กก. จำนวน 100 กก. Solar Dryer มีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงเท่ากับ 80, 100 และ 180 ซม. ตามลำดับ ปิดด้วยกระจกใสหนา 6 มม. 3 ด้าน ด้านทิศเหนือ ทิศใต้ และทิศตะวันตก และปล่องระบายอากาศติดลูกหมุนสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 ซม. มีชั้นวางผลิตภัณฑ์ 5 ชั้น ทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 2 มม. ความกว้าง 80 ซม. ความยาว 100 ซม. ขนาดรูตะแกรง 3.2 มม. ด้านล่างปิดด้วยแผ่นสมาร์ทบอร์ด

นอกจากนี้จากการศึกษาระยะเวลาในการกักเก็บความร้อนของขี้ผึ้ง พบว่า การกักเก็บความร้อนของขี้ผึ้ง สามารถรักษาอุณหภูมิหลังจากที่แสงอาทิตย์หมดไป เป็นเวลา 4 - 5 ชั่วโมง อุณหภูมิ 32 - 40 °C ดัง figure 3

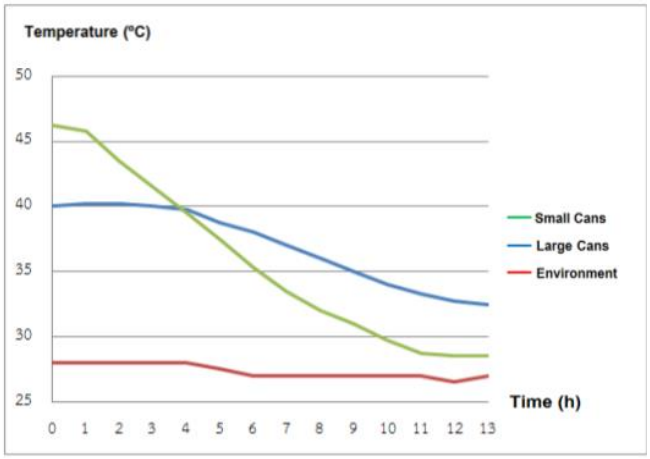


Figure 3 The Storage Temperature of the Beeswax.

ประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ

จากการศึกษาคุณสมบัติของขี้ผึ้งพบว่า ขี้ผึ้งมีค่าความจุความร้อน 63.88 kJ/kg.K และมีอุณหภูมิของวัสดุกักเก็บความร้อน (ขี้ผึ้ง) สูงสุดอยู่ที่ 343.15 K (70 ^{o}C) ที่เวลา 13.00 น. ดังนั้นค่าการเก็บกักความร้อนของสสารเปลี่ยนสถานะของขี้ผึ้งคือ 204.40 MJ และจากการศึกษาประสิทธิภาพประสิทธิภาพของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะพบว่า แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่เวลา 13.00 น. เช่นกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพตัวรับรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ 48.07 % ดัง Table 2

Tabel 2 The Heat Retention for Beeswax and Efficiency Substance Changes State Solar Collector.

Time	Beeswax			Flat Plate Solar Collector						
	T_B (K)	T_A (K)	Q (MJ)	$\dot{m}_a$ (kg/s)	C_p (kJ/kg.K)	T_f (K)	T_i (K)	$\dot{m}_a$ Gt (kW/m2)	A_C (m^2)	η_c (%)
08.00 a.m.	315.15	301.15	89.42			315.15	301.15			21.03
09.00 a.m.	324.15	303.15	134.14			324.15	303.15			32.54
10.00 a.m.	333.15	305.15	191.63			333.15	305.15			42.06
11.00 a.m.	331.15	305.15	166.08			331.15	305.15			39.05
12.00 a.m.	335.15	308.15	172.46			335.15	308.15			40.55
13.00 p.m.	343.15	311.15	204.4			343.15	311.15			48.07
14.00 p.m.	335.15	309.15	166.08	0.02	1.02	335.15	309.15	0.679	2	39.05
15.00 p.m.	336.15	309.15	172.46			336.15	309.15			41.55
16.00 p.m.	326.15	307.15	121.36			326.15	307.15			28.54
17.00 p.m.	318.15	305.15	83.04			318.15	305.15			19.52
18.00 p.m.	309.15	303.15	32.32			-	-			-
19.00 p.m.	308.15	303.15	31.94			-	-			-
20.00 p.m.	307.15	303.15	25.55			-	-			-
21.00 p.m.	307.15	303.15	25.55			-	-			-

การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ พบว่า ราคาแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ 15,000 บาท ค่าใช้จ่ายคงที่ 16,969 บาท/ปี ค่าใช้จ่ายแปรผัน 121,500 บาท/ปี จุดคุ้มทุน 274 กิโลกรัม และระยะเวลาคืนทุน 72 วัน

สรุป

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสมุนไพร พบว่า สมุนไพร มีขนาด และน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับพื้นที่เพาะปลูก และความสมบูรณ์ของสมุนไพรนั้นๆ ค่าสี เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ส่วนความชื้นเป็นไปตามทฤษฎี แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ฯ สามารถทำนายการอบแห้งได้ดี มีผลใกล้เคียงกับการทดลองทำให้สะดวกในการอบแห้ง และขี้ผึ้งสามารถเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งสมุนไพร หลังจากที่แสงอาทิตย์หมดไปได้ประมาณ 4 - 5 ชั่วโมง อุณหภูมิ 32 - 40 ^oC โดยราคาแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ มีประสิทธิภาพเท่ากับ 48.07 %ราคาแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบสสารเปลี่ยนสถานะ 15,000 บาท มีจุดคุ้มทุน 274 กิโลกรัม และระยะเวลาคืนทุน 72 วัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จารุวัฒน์ เจริญจิต. 2557. **เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์และแนวทางการพัฒนา**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://resjournal.kku.ac.th/abstract/17_1_110.pdf. 10 มกราคม 2558.

วินิต ชินสุวรรณ. 2546. **เครื่องจักรกลเกษตรและการจัดการเบื้องต้น**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Rabl, A. 1985. **Active Solar Collectors and Their Applications. Oxford University Press**. New York.

ASTM Standard. D3173. 1997. **Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample.** American Society for Testing and Materials. U.S.A.

Quaschning, V . 2004. **Flat Plate Solar Collector**. [Online]. Source : http://www.volker-quaschning.de/articles/fundamentals4/index_e.php, 15 มิถุนายน 2558.

Cengel,Y. A. and M. A. Boles. 1998. **Thermodynamics an Engineering Approach Third Edition**.1010 p.

การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุก ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา จังหวัดลำปาง

Application of Geographic Information System for Risk Forest Area Encroachment Assessment, Mae Ngao on the Right Side National Reserved Forest, Lampang Province

สุภาภรณ์ ผ่องศาลา*

Supaporn Phongsala*

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุก ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา จังหวัดลำปางโดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2545,2551 และ 2557พบว่า พื้นที่ป่าไม้ลดลง มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 12.95 ของพื้นที่ป่าทั้งหมด พื้นที่เกษตรกรรมเพิ่มขึ้นมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 150.50 ของพื้นที่เกษตรกรรม ปี 2545 รองลงมาคือ พื้นที่โล่ง แหล่งน้ำ และชุมชน คิดเป็นร้อยละ 216.00, 136.36 และ 606.42 ตามลำดับ และการกำหนดพื้นที่ ป่าที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุก โดยการวิเคราะห์ ทางสถิติ หาความสัมพันธ์ กับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบจำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ ความลาดชัน ตำแหน่งหมู่บ้าน ถนน ปัญหาการถือครองที่ดิน และชนิดป่า ผลการศึกษายังพบว่า มีพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 87.05 ของพื้นที่ป่ารองลงมาคือ พื้นที่ป่า ที่เสี่ยงต่อการบุกรุกปานกลาง และพื้นที่ ป่าที่ เสี่ยงต่อการบุกรุกสูง คิดเป็นร้อยละ 7.85 และ 5.10 ตามลำดับ โดยพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำคือ พื้นที่ป่าเบญจพรรณและมีความลาดชันสูง ส่วนพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกสูง พบในพื้นที่ป่าดิบแล้ง ใกล้ถนน และอยู่ในพื้นท้องที่ตำบลจางเหนือเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อตรวจสอบความถูกต้อง พบว่า มีความถูกต้องรวมร้อยละ 72.5

ABSTRACT

Application of geographic information system for risk forest area encroachment assessment, Mae Ngao on the Right Side National Reserved Forest, Lampang Province in 2002, 2008 and 2014 found that the most decreasing areas was forest accounted 12.95 percent of the total, the most increasing areas was agriculture area accounted 151.50 percent followed by the bare land, water bodies and communities as 216.00, 136.36 and 606.42 percent respectively, and to determine the areas at risk of being encroachment. By statistical analysis of relationship with environmental factors, 5 factors that a 95 percent of confidence interval include slope, village, road, land tenure and forest types. The results showed that there are the most risk areas was low risk of encroachment87.05 percent followed by the moderate risk areas encroachment and a high risk areas of encroachment as7.85 and 5.10 percent respectively. The risk area is less encroachment forest that in mixed deciduous forest and high slope. The area of high risk of encroachment is that in dry evergreen forest and closed the road. The audit found that the accuracy is accurate to the percentage of 72.5

Key Words: Geographic Information System, Risk area, Mae Ngao on the Right Side National Reserved Forest

* Corresponding author; e-mail address: **theboran7@gmail.com**

สาขาวิชาการบริหารทรัพยากรป่าไม้และสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Forest Resource Administration, The graduate school, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ทรัพยากรป่าไม้เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมในปี พ.ศ. 2551 มีพื้นที่ป่าร้อยละ 33.44ปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ป่าเหลือเพียงร้อยละ 31.57 ของพื้นที่ประเทศ(กรมป่าไม้, 2558) จากสถิติป่าไม้ที่ผ่านมามีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ในอัตราร้อยละ 0.27 ต่อปี สาเหตุหลักมาจากการบุกรุกทำลายป่า จำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ประชาชนมีความต้องการขยายที่อยู่อาศัย รวมถึงพื้นที่เกษตรกรรม ประชาชนขาดการวางแผนในการใช้ที่ดินอย่างมีประสิทธิภาพ จากสภาพปัญหาดังกล่าว กองอำนวยการรักษาความมั่นคงภายในราชอาณาจักร (กอ.รมน.) กรมป่าไม้ และกรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่า และพันธุ์พืช ได้ร่วมประเมินระดับความรุนแรงของสถานการณ์การบุกรุกทรัพยากรป่าไม้ โดยเรียงลำดับความรุนแรง พบว่ามีพื้นที่วิกฤตรุนแรง 12 จังหวัด พื้นที่วิกฤต 33 จังหวัด รวมพื้นที่วิกฤต 45 จังหวัด มากกว่าครึ่งของประเทศ (กองอำนวยการรักษาความมั่นคงภายในราชอาณาจักร, 2557)

ป่าสงวนแห่งชาติ ป่าแม่งาวฝั่งขวา จังหวัดลำปางตั้งอยู่ในตำบลบ้านโป่ง ตำบลบ้านหวด และตำบลแม่ตีบ อำเภองาว และตำบลจางเหนือ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ถูกประกาศเป็นป่าสงวนแห่งชาติเมื่อวันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2518 ตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 722 (พ.ศ.2518) จากสภาพในปัจจุบันแสดงให้เห็นถึงการประสบกับปัญหาการบุกรุกทำลายทรัพยากรป่าไม้อย่างรุนแรง ซึ่งการลาดตระเวนของเจ้าหน้าที่จากหน่วยป้องกันรักษาป่าอาจมีกำลังคนไม่เพียงพอและอาจไม่ทั่วถึงต่อการเฝ้าระวังและป้องกันพื้นที่ป่าไม้จากการถูกบุกรุกจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาเครื่องมือและวิธีการการป้องกันที่มีความทันสมัย ประหยัดทั้งเวลาและงบประมาณ เข้ามาช่วยในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ ในการศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุก ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา จังหวัดลำปาง เพื่อศึกษาสภาพการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา และประเมินพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุก โดยสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางป้องกันการบุกรุกทำลายป่าในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา จังหวัดลำปางต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ภาพถ่ายดาวเทียม landsat-5 ปีพ.ศ. 2545, 2551 และ landsat-8 ปี 2557
2. คอมพิวเตอร์ พร้อมโปรแกรมสำเร็จรูป
3. อุปกรณ์เครื่องเขียน และเครื่องบันทึกข้อมูล
4. โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (ArcGIS)
5. โปรแกรม google earth
6. โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิธีการ

1. รวบรวมและจัดเตรียมข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์

รวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ ข้อมูลทุติยภูมิ ทั้งข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลเชิงบรรยาย รวมถึงข้อมูลภูมิศาสตร์ที่เป็นปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องและมีความสัมพันธ์ต่อการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุก และ

ออกแบบสร้างฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

1.1 จัดเตรียมชั้นข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยมีทั้งหมด 10 ชั้นข้อมูล ได้แก่ ชั้นความสูงความลาดชันชุดดินแหล่งน้ำเส้นทางถนนหน่วยป้องกันรักษาป่า ชนิดป่า ตำแหน่งหมู่บ้าน รายได้เฉลี่ยในตำบลและปัญหากรรมสิทธิ์ในการถือครองที่ดิน

1.2 การนำเข้าข้อมูลทั้งหมดสู่ฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ArcGIS โดยแปลงข้อมูลทางแผนที่ให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ในลักษณะจุด (point) เส้น (line) และพื้นที่ (polygon) ให้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข (digital) ที่คอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถอ้างอิงพิกัดทางแผนที่ได้

1.3ทำการเชื่อมโยงความสำพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงพื้นที่ (spatial data) ของแผนที่ร่วมกับข้อมูลเชิงบรรยาย (attribute data) ซึ่งแสดงคุณลักษณะของข้อมูล เพื่อให้ข้อมูลเชิงพื้นที่มีรายละเอียดกำกับ

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 วิเคราะห์และศึกษาสภาพการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในเขตป่าสงวนแห่งชาติ ป่าแม่งาวฝั่งขวา ปี พ.ศ. 2545,2551 และ 2557โดยนำภาพถ่ายดาวเทียม landsat-5 (TM) ปี พ.ศ. 2545, 2551 และ landsat-8 (TM) ปี พ.ศ. 2557วิเคราะห์หาสภาพการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุก ซึ่งจำแนกสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินออกเป็น 7 ประเภท คือ ป่าเต็งรัง ป่าเบญจพรรณ ป่าดิบแล้ง ชุมชน พื้นที่เกษตรกรรม แหล่งน้ำ และพื้นที่โล่ง ในการแปลภาพถ่ายดาวเทียมในครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรมประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งได้มีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง และใช้วิธีการจำแนกด้วยสายตา

2.2 วิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุก

วิธีการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุก ได้มีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษา ตามนิรันดร(2551) ดังนี้

2.2.1 เลือกและกำหนดจุดในพื้นที่ศึกษา จำนวน 200 จุด ให้ครอบคลุมและกระจายทั่วพื้นที่ สุ่มเลือกจุดตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพป่าจริงและอีก 200 จุดสุ่มเลือกจุดให้ครอบคลุมและกระจายทั่วพื้นที่เช่นกัน โดยอยู่ในบริเวณขอบเขตป่าในปัจจุบัน

2.2.2 จัดแบ่งจุดตำแหน่งที่ได้จากการเลือกออกเป็น 2 ชุด โดยร้อยละ 80 ของตำแหน่งที่เลือกนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง โดยใช้วิธีการทางสถิติ สร้างสมการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรด้วยวิธี logistic regression analysis ตาม กัลยา(2544) ดังสมการที่ (1)

$$E(Y) = P(Event) = \frac{\varepsilon^{\beta 0 + \beta 1 X 1 + \beta 2 X 2 + \cdots + \beta n X p}}{1 + \varepsilon^{\beta 0 + \beta 1 X 1 + \beta 2 X 2 + \cdots + \beta n X p}} \quad (1)$$

E(Y) คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์

$\varepsilon^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_p}$ คือ ตัวแบบที่ใช้พิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ

$X_1,\ X_2\ ,\ X_3\ \ldots\ X_p$ คือ ตัวแปรอิสระ

จากการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติ ป่าแม่งาวฝั่งขวา ซึ่งอยู่ในช่วง 0.00-1.00 โดยแบ่งช่วงระดับความเสี่ยงออกเป็น 3 ระดับ คือ

ระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำ ค่า E(Y) = 0.00-0.33

ระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกปานกลาง ค่า E(Y) = 0.34-0.67

ระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกสูง ค่า E(Y) = 0.68-1.00

2.2.3 ตำแหน่งที่เหลืออีกร้อยละ 20 นำมาทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวาโดยการใช้ตำแหน่งที่ได้ที่เหลือ (20%) จำนวน 40 จุดเป็นตัวแทนในการตรวจสอบความถูกต้องมาทำการซ้อนทับกับแผนที่ความเสี่ยงต่อการบุกรุกที่ได้จากการวิเคราะห์ถ้าค่าความน่าจะเป็นมีค่ามากกว่า 0.50 หมายถึงมีความเสี่ยงต่อการถูกบุกรุกและถ้าค่าความน่าจะเป็นมีค่าน้อยกว่า 0.50 หมายถึงไม่มีความเสี่ยงต่อการถูกบุกรุก

2.2.4 ทำการตรวจสอบ แก้ไขข้อมูล รวมถึงการสรุปผลการศึกษาและเสนอผลงาน เพื่อเสนอแนวทางในการป้องกัน เฝ้าระวังพื้นที่ป่าที่มีความเสี่ยงต่อการบุกรุกในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา จังหวัดลำปางในการปฏิบัติงานในพื้นที่ต่อไป

ผลและวิจารณ์

จากการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา จังหวัดลำปาง โดยได้ทำการศึกษา 2 ขั้นตอน คือ ศึกษาสภาพการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา ปีพ.ศ.2545,2551 และ 2557 และการวิเคราะห์พื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา ซึ่งมีผลการศึกษา ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินใน เขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา ปี พ.ศ.2545,2551 และ 2557

จากการใช้ประโยชน์ที่ดินออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ พื้นที่ป่า (ป่าเต็งรัง ป่าเบญจพรรณ และป่าดิบแล้ง) ชุมชน พื้นที่เกษตรกรรม แหล่งน้ำ และพื้นที่โล่ง จากการจำแนกด้วยสายตาโดยใช้ภาพถ่าย ดาวเทียม landsat-5 (TM) ปี 2545,2551 และ landsat-8 (TM) ปี 2557และในช่วง 12 ปีมีการเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินดังTable1อธิบายได้ ดังนี้

1.1 พื้นที่ป่าไม้จากเดิม พ.ศ. 2545 ที่มีพื้นที่ 642.47ตารางกิโลเมตร พบว่า พื้นที่ป่าลดลง 83.19 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 12.95 ของพื้นที่ป่าทั้งหมด เหลือเพียง 559.278 ตารางกิโลเมตร จำแนกตามชนิดป่าได้ 3 ชนิด ได้แก่ ป่าเต็งรัง ป่าเบญจพรรณ และป่าดิบแล้ง ซึ่งพื้นที่ลดลง 10.58, 72.60 และ 0.01 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 7.73,15.10 และ 0.04 ของพื้นที่ป่าแต่ละชนิด ตามลำดับโดยส่วนใหญ่

Table1 Land use Types in Mae Ngao on the right side national reserved forest, Lampangn provinceduring 2002-2014.

Land use	2002		2008		2014		Change 2002-2014 (+/-)		Rate of change /Year (+/-)
	km^2	%	km^2	%	km^2	%	km^2	%	km^2
1. Forestarea	642.47	92.59	599.26	86.36	559.27	80.6	-83.19	12.95	-6.93
Dry dipterocarp forest	136.87	19.72	150.77	21.73	126.29	18.2	-10.58	7.73	-0.88
Mixed deciduous forest	480.74	69.28	423.56	61.04	408.14	58.82	-72.6	15.1	-6.05
Dry evergreen forest	24.86	3.58	24.92	3.59	24.85	3.58	-0.01	0.04	0
2.Agriculture area	49.63	7.15	89.52	12.9	124.82	17.99	75.19	151.5	6.27
3. Water bodies	0.5	0.07	1.42	0.2	1.58	0.23	1.08	216	0.09
4. Urban	0.22	0.03	0.43	0.06	0.52	0.08	0.3	136.36	0.03
5. Bare land	1.09	0.16	3.27	0.47	7.7	1.11	6.61	606.42	0.55
Total	693.9	100	693.9	100	693.9	100	0	-	0

พื้นที่เปลี่ยนแปลงสภาพไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรม 76.58 ตารางกิโลเมตรและพื้นที่โล่ง 6.61 ตารางกิโลเมตร จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพป่า 2 ช่วงเวลา คือ ตั้งแต่ ปี 2545-2551และปี 2551-2557 เห็นได้ชัดเจนว่าพื้นที่ป่าส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลง ในอัตรา เฉลี่ย 6.93 ตารางกิโลเมตรต่อปี ซึ่งเกิดจากการบุกรุกพื้นที่ป่าทำเกษตรกรรมกระจายอยู่รอบๆ แนวป่าเดิมที่เหลืออยู่ของป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา เนื่องจากพื้นที่บุกรุกส่วนใหญ่อยู่ห่างจากหน่วยป้องกันรักษาป่า เจ้าหน้าที่ลาดตระเวนไม่ทั่วถึง และแนวเขตป่ายังไม่มีความชัดเจน

1.2 พื้นที่เกษตรกรรม เป็นพื้นที่ที่ประกอบด้วย นาข้าว พืชไร่ และพืชสวน พบว่าเพิ่มขึ้น 75.19 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 151.50 ของพื้นที่เกษตรกรรม ปี 2545 พบกระจายอยู่ใกล้เคียงกับแหล่งชุมชนและรอบๆ แนวป่า จากการศึกษาในระยะการเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน 2 ช่วงเวลา พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ย 6.27 ตารางกิโลเมตรต่อปี

1.3 แหล่งน้ำ โดยส่วนใหญ่เป็นแหล่งน้ำขนาดเล็กถึงขนาดกลางกระจายอยู่ใกล้กับพื้นที่เกษตรกรรม พบว่า แหล่งน้ำเพิ่มขึ้น 1.08 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 216.00ของพื้นที่แหล่งน้ำ ปี 2545 จากการศึกษาในระยะการเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน 2 ช่วงเวลา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่อยู่ในอัตรา 0.09 ตารางกิโลเมตรต่อปี

1.4 ชุมชน มีการขยายแหล่งชุมชนจากเดิมนอกเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวาเข้ามายังในเขตป่าสงวนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากเดิมที่เคยเป็นพื้นที่เกษตรกรรม พบว่าแหล่งชุมชนเพิ่มขึ้น 0.30 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 136.36 ของพื้นที่แหล่งชุมชนปี 2545 จากการศึกษาในระยะการเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน 2 ช่วงเวลา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในอัตราเฉลี่ย 0.03 ตารางกิโลเมตรต่อปี

1.5 พื้นที่โล่ง เป็นพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากพื้นที่เกษตรกรรมแล้วได้ทิ้งพื้นที่ให้รกร้างว่างเปล่า พื้นที่ลานหินกว้างหรือพื้นที่ที่ไม่มีพืชพรรณใดๆ ปกคลุม และเป็นพื้นที่ที่เกิดไฟป่า พบว่า พื้นที่โล่งเพิ่มขึ้น 6.61

ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อย ละ 606.42 ของพื้นที่โล่งปี 2545 จากการศึกษาในระยะการเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดิน 2 ช่วงเวลา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในอัตราเฉลี่ย 0.55ตารางกิโลเมตรต่อปี

2. พื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวา

การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกจากการนำเข้าปัจจัยแวดล้อมทั้งหมด 10 ปัจจัย เพื่อหาความสัมพันธ์ และสร้างสมการ logistic regression model พบว่า ปัจจัยแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์ที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการบุกรุกมีทั้งหมด 5 ปัจจัย ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ได้แก่ ความลาดชัน ตำแหน่งหมู่บ้าน เส้นทางถนน ปัญหาการถือครองที่ดิน และชนิดป่า ดัง Table 2

Table 2 Variables in the Equation.

Variable	B	S.S.E.	Sig.
Slope(X_1)	-0.028	0.013	0.037
Village (X_2)	-0.201	0.100	0.046
Road(X_3)	-0.613	0.120	0.000
Problem of glossary land tenure (X_4)	1.025	0.407	0.012
Type of forest (X_5)	-3.235	0.372	0.000
Constant	4.622	1.078	0.000

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Logistic regression analysis พบว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรกับพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

จากสมการ $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5$

จะได้ $Y = 4.622 - 0.028 X_1 - 0.201 X_2 - 0.613 X_3 + 1.025 X_4 - 3.235 X_5$

การกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกมีค่าความน่าจะเป็นในช่วง 0 ถึง 1 โดยแบ่งระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกออกเป็น 3 ระดับคือเสี่ยงต่อการบุกรุกน้อยเสี่ยงต่อการบุกรุกปานกลางและเสี่ยงต่อการบุกรุกสูง และนำค่าที่ได้สร้างข้อมูลเชิงภาพเป็นแผนที่เสี่ยง ดัง figure1 ผลการศึกษา การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวาสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 พื้นที่ป่าที่มีระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำมีค่าความน่าจะเป็นอยู่ในช่วง 0–0.33 มีพื้นที่ 486.83 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ87.05ของพื้นที่ป่าแม่งาวฝั่งขวา

2.2พื้นที่ป่าที่มีระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกปานกลางมีค่าความน่าจะเป็นอยู่ในช่วง 0.34–0.67 มีพื้นที่ 43.90 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ7.85ของพื้นที่ป่าแม่งาวฝั่งขวา

2.3 พื้นที่ป่าที่มีระดับความเสี่ยงต่อการบุกรุกสูงมีค่าความน่าจะเป็นในช่วง 0.68–1.00 มีพื้นที่28.54 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ5.10ของพื้นที่ป่าแม่งาวฝั่งขวา

การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติ ป่าแม่งาวฝั่งขวา โดยนำตำแหน่งที่เหลือร้อยละ 20 จำนวน 40 จุด ทำการซ้อนทับกับแผนที่ความเสี่ยงต่อการบุกรุกพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวาที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นหากมีค่ามากกว่า 0.50 คือ พื้นที่มีความเสี่ยงต่อการ

ถูกบุกรุก และหากความน่าจะเป็นมีค่าน้อยกว่า 0.50 คือ พื้นที่ไม่มีความเสี่ยงต่อการถูกบุกรุก พบว่า มีจำนวนจุดที่มีความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 72.5

สรุป

การศึกษาสภาพการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาว ฝั่งขวา จังหวัดลำปาง ปี 2545,2551 และ 2557 พบว่า พื้นที่ป่าไม้ลดลง มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 12.95 ของพื้นที่ป่าทั้งหมด พื้นที่เกษตรกรรมเพิ่มขึ้นมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 150.50 ของพื้นที่เกษตรกรรม ปี 2545 รองลงมาคือ พื้นที่โล่ง แหล่งน้ำ และชุมชน คิดเป็นร้อยละ 216.00, 136.36 และ 606.42 ตามลำดับ ซึ่งพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาว ฝั่งขวามีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ บริเวณรอบแนวป่าที่ติดกับพื้นที่เกษตรกรรม อาจมีการขยายพื้นที่เกษตรกรรมเพิ่มมากขึ้น

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติจากการวิเคราะห์ด้วยสมการ logistic regression analysis พบว่าปัจจัยแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์ที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการบุกรุกมีทั้งหมด 5 ปัจจัย ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ได้แก่ ความลาดชัน ตำแหน่งหมู่บ้าน เส้นทางถนน ปัญหาการถือครองที่ดิน และชนิดป่า ผลการศึกษาพบว่า มีพื้นที่ที่มีระดับเสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำ 486.83 ตารางกิโลเมตร พื้นที่ ที่มีระดับเสี่ยงต่อการบุกรุกปานกลาง 43.9 ตารางกิโลเมตร และพื้นที่ที่มีระดับเสี่ยงต่อการบุกรุกสูง 22.93 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 87.05, 7.85 และ 5.10 ตามลำดับ โดยพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกต่ำคือ พื้นที่ป่าเบญจพรรณและความลาดชันต่ำ ส่วนพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการบุกรุกสูง พบในพื้นที่ป่าดิบแล้ง ใกล้เส้นทางถนน และอยู่ในพื้นท้องที่ตำบลจางเหนือเป็นส่วนใหญ่

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบร้อยละของความถูกต้องของแผนที่ความเสี่ยงต่อการบุกรุกในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าแม่งาวฝั่งขวาพบว่ามีความถูกต้องรวมร้อยละ 72.5

เอกสารอ้างอิง

กรมป่าไม้.2558. **เนื้อที่ป่าไม้ของประเทศไทย**. แหล่งที่มา: http://forestinfo.forest.go.th/55/Content.aspx?id=72,20 มกราคม 2558.

กองอำนวยการรักษาความมั่นคงภายในราชอาณาจักร. 2557. **แผนแม่บทแก้ไขปัญหาการทำลายทรัพยากรป่าไม้ การบุกรุกที่ดินของรัฐและการบริหารจัดการ**. สำนักนายกรัฐมนตรี,กรุงเทพฯ.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2544. **การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวด้วย SPSS for Windows**. ภาควิชาสถิติ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

นิรันดรมรกตเขียว. .2551. **การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกบริเวณอุทยานแห่งชาติภูผาม่านจังหวัดขอนแก่น**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

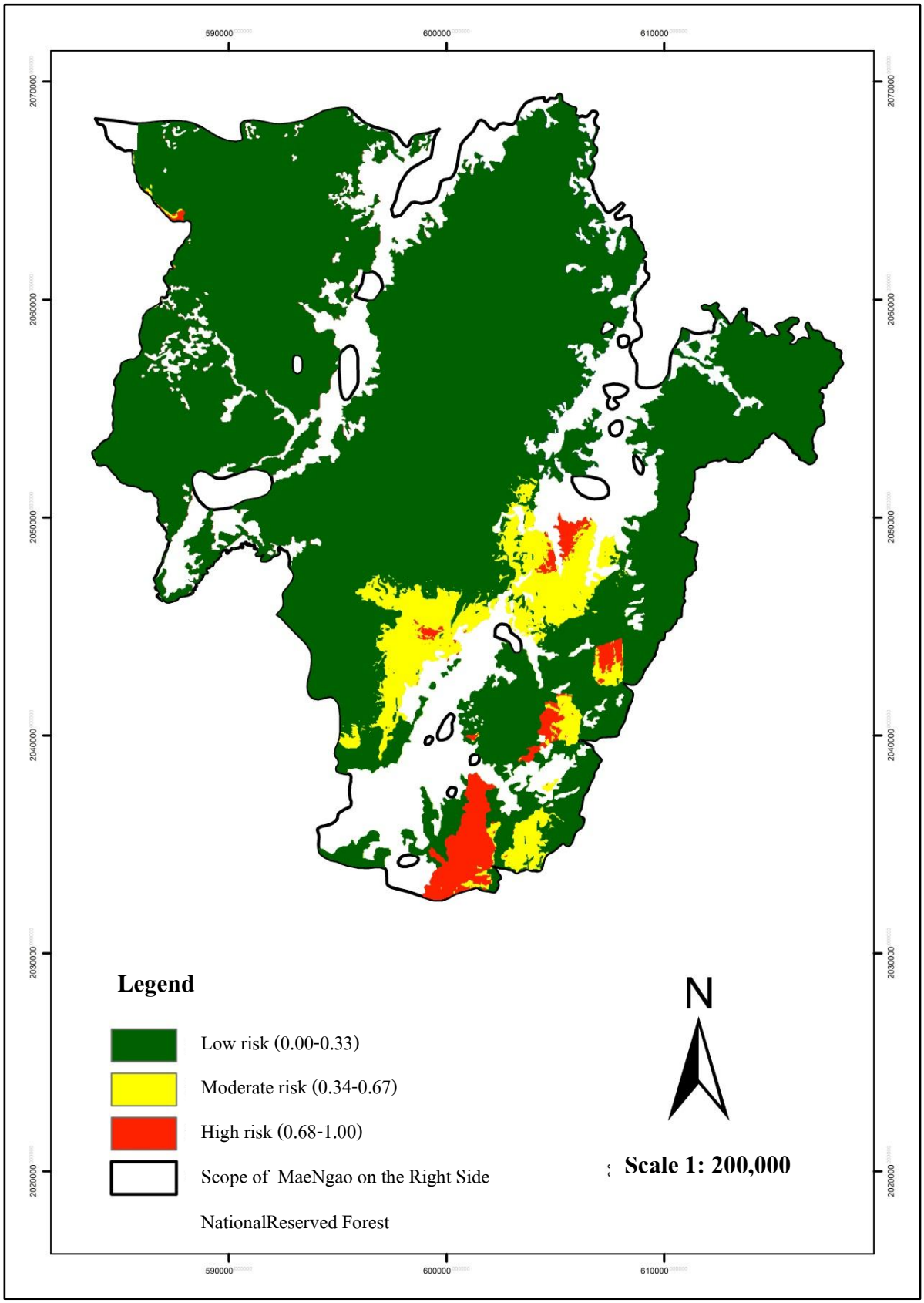


Figure 1 Risk area map of Mae Ngao on the right side national reserved forest, Lampang province

ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง

Factors Effecting Community – based Adaptation on Thalay Noi Head Watershed Management, Kohtao Sub - district Paphayom District, Phatthalung Province.

กิติชัย รัตนะ*

Kitichai Rattana*

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาพเศรษฐกิจ สังคม และปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง การวิจัยครั้งนี้ใช้การศึกษาวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) และการสนทนากลุ่มย่อย (Focus Group Discussion) ควบคู่กับการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 13 หมู่บ้าน จำนวน 355 ตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธีทางสถิติค่า t-test และค่า F-test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง ได้แก่ สถานภาพในชุมชน อาชีพหลัก การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวภาพในลุ่มน้ำ ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม การรับรู้ข้อมูลข่าวสาร รวมทั้งศักยภาพและทุนทางสังคมของชุมชน

ABSTRACT

The purposes of this research were to study socio-economic status, factors affecting opinion of Community – based Adaptation on Thalay Noi Head Watershed Management, Kohtao Sub - district Paphayom District, Phatthalung Province. This study employed a survey research, focus group discussion at local level and Participatory Action Research. Data were collected by using questionnaire for 355 head of all households in 13 villages of Kohtao Sub - district Paphayom District, Phatthalung Province. t- test and F-test were used to analyze data at confidencial level of 0.05. The results indicated that factors affecting opinion of Community – based Adaptation on Thalay Noi Head Watershed Management, Kohtao Sub - district Paphayom District, Phatthalung Province, are community status, occupation, bioresources utilization in Watershed, knowledge of natural resources and environment, information perception, and community potential and social capital.

Key Words: community – based adaptation, Thalay Noi head watershed, Phatthalung Province

*Corresponding author; e-mail address: kcr276@hotmail.com

* ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

* Department of Conservation, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ลุ่มน้ำทะเลน้อย เป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา มีพื้นที่ครอบคลุมอยู่ในอำเภอป่าพะยอม อำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง มีพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 600 ตารางกิโลเมตร ซึ่งเป็นพื้นที่ป่าต้นน้ำที่สำคัญของจังหวัดพัทลุง ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันนั้นการบุกรุกทำลายพื้นที่ป่าต้นน้ำเพื่อเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ป่าไม้เป็นพื้นที่เกษตรกรรมเป็นหลัก และเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่เกษตรกรรม จากการปลูกพืชชนิดหนึ่งไปเป็นพืชอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งในประเด็นนี้เกิดจากการส่งเสริมพืชเศรษฐกิจตามนโยบายของรัฐ เช่น ยางพารา ไม้ผลเศรษฐกิจ จากปัญหาดังกล่าวนั้นได้ส่งผลทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่ประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำเพื่อการเกษตร พื้นที่ที่สามารถเข้าถึงการใช้น้ำได้จะเป็นพื้นที่ใกล้ลำน้ำ และใช้น้ำได้เพียงบางห้วงเวลาตามปริมาณน้ำที่ไหลอยู่ในลำน้ำ และประเด็นปัญหาความขัดแย้งระหว่างชุมชนท้องถิ่น เกษตรกรกับเจ้าหน้าที่ป่าไม้ในเรื่องการบุกรุกที่ดินป่าไม้ในเขตพื้นที่อนุรักษ์ และป่าสงวนแห่งชาติใกล้เคียง ซึ่งเป็นประเด็นปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นประจำ

ประชากรที่ตั้งถิ่นฐานในพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง มีประมาณ 12,065 คน หรือ 3,105 ครัวเรือน คิดเป็น 3.88 คนต่อครัวเรือน ประชาชนในพื้นที่ส่วนใหญ่ประกอบอาชีพทำสวนยางพารา สวนปาล์มน้ำมัน และสวนผลไม้ เป็นหลัก สภาพปัญหาของพื้นที่ลุ่มน้ำประสบปัญหาความเสื่อมโทรมของลุ่มน้ำ อันเป็นผลมาจากการใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่บริเวณป่าต้นน้ำเป็นพื้นที่เกษตรกรรม การบุกรุกทำลายพื้นที่ป่าไม้ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศป่าต้นน้ำ การชะล้างพังทลายของดิน และการตื้นเขินของลำห้วยธรรมชาติ จากปัญหาดังกล่าวทำให้ชุมชนที่อยู่ในพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง ตระหนักถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจึงได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบวิถีชีวิตไปจากเดิมมาก สิ่งที่ปรากฏเห็นได้ชัดคือการพึ่งพิงภูมิปัญญาท้องถิ่นในการทำเกษตรกรรม การใช้ทรัพยากรธรรมชาติในท้องถิ่นอย่างรู้คุณค่า การมีส่วนร่วมของชุมชนต่อกิจกรรมด้านการอนุรักษ์ และค่านิยมความเชื่อต่างๆ ส่งผลกระทบทางบวกต่อความสามารถในการจัดการตนเอง และการมุ่งเน้นเศรษฐกิจพอเพียงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

การวิจัยนี้ มีความมุ่งหมายในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง และการส่งเสริมบทบาทของนักวิจัยชุมชนในการมีส่วนร่วมในการวางแผนบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำ โดยใช้การวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) ควบคู่กับการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม (Whyte, 1991; Mills, 2000) โดยให้ความสำคัญกับหน่วยวิจัยระดับชุมชนที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย เพื่อให้ผลการวิจัยนำไปสู่การวางแผนงานด้านการส่งเสริมการปรับตัวของชุมชน เพื่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำให้สอดคล้องกับบริบทและความต้องการของชุมชนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. ประเมินสภาพแวดล้อมชุมชนแบบมีส่วนร่วม (Participatory Rural Appraisal: PRA) โดยศึกษาประวัติชุมชน ทุนทางสังคมของชุมชน ประเด็นปัญหาด้านทรัพยากรธรรมชาติ โดยประยุกต์ใช้แนวคิดของ Bechstedt (1997); Whyte (1991); Mills (2000) และกิติชัย (2549)

2. สำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลด้านประชากร และสภาพเศรษฐกิจ สังคม และประเด็นปัญหา ด้านสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ต้นน้ำ การปรับตัว/เตรียมความพร้อมของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย โดยคำนวณประชากรตัวอย่างจากจำนวนครัวเรือนที่อยู่ในพื้นที่ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง ตามหลักการของ Yamane (1973); บุญธรรม (2531) ทำให้ได้ประชากรตัวอย่าง 355 ตัวอย่าง สุ่มตัวอย่างแบบง่าย

(Simple Random Sampling) กระจายตามหมู่บ้านเป้าหมายทั้ง 13 หมู่บ้าน ผู้เก็บข้อมูลผ่านการอบรมให้ความรู้ในการสำรวจข้อมูลทางสังคมศาสตร์ แบบสอบถามประกอบการสัมภาษณ์ผ่านการตรวจประเมินความเที่ยงตรง (Validity) จากผู้เชี่ยวชาญเพื่อปรับแก้ไขความยากง่ายของข้อคำถามในแต่ละประเด็นเพื่อเป็นไปตามระเบียบวิธีวิจัยทางสังคมศาสตร์ (สิน, 2547; สุชาติ, 2540)

3. สัมภาษณ์แบบเจาะลึก (In-depth Interviews) และการสนทนากลุ่มย่อย (Focus Group Discussion: FGD) ร่วมกับกลุ่มผู้ให้ข้อมูลหลัก (Key Informants) ได้แก่ กลุ่มเกษตรกร กลุ่มผู้ใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย กลุ่มผู้นำชุมชน กลุ่มองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น กลุ่มเจ้าหน้าที่รัฐ โดยเน้นการประเมินความพร้อมในการปรับตัวของชุมชน ศักยภาพและทุนทางสังคมของชุมชน โดยประยุกต์ใช้ให้สอดคล้องกับแนวคิดของ สุภางค์ (2545); วิชา และกิติชัย (2547); ผ่องพรรณ และสุภาพ (2545)

4. คัดเลือกอาสาสมัครนักวิจัยชุมชนที่เป็นตัวแทนในพื้นที่ต้นน้ำ จำนวน 40 คน พร้อมทั้งประเมินความต้องการฝึกอบรม (Training Need) และการอบรมพัฒนาศักยภาพในการวางแผนบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อยแบบมีส่วนร่วม และประเมินความรู้ก่อนและหลังผ่านการฝึกอบรมพัฒนาศักยภาพ

5. ร่วมกระบวนการจัดทำแผนปฏิบัติการชุมชนในจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อยอย่างมีส่วนร่วมของอาสาสมัครนักวิจัยชุมชน และริเริ่มกิจกรรมนำร่องของชุมชน และมีการประเมินผลการดำเนินกิจกรรมของชุมชนโดยใช้เทคนิคการประเมินผลหลังการปฏิบัติ (After Action Review: AAR)

ผลและวิจารณ์

1. การสำรวจข้อมูลประชากร/สภาพทางเศรษฐกิจ – สังคมของชุมชน

ผลการสำรวจข้อมูลด้านประชากรและเศรษฐกิจ-สังคม ในพื้นที่ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง จำนวน 355 ตัวอย่าง พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศชาย คิดเป็นร้อยละ 64.5 ส่วนใหญ่มีจำนวนสมาชิกในครอบครัว 4-6 คน คิดเป็นร้อยละ 85.6 และส่วนใหญ่มีสถานภาพเป็นกลุ่มลูกบ้าน คิดเป็นร้อยละ 64.2 กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีภูมิลำเนาเดิมอยู่ในพื้นที่ คิดเป็นร้อยละ 94.4 โดยมีการตั้งถิ่นฐานมากกว่า 25 ปี คิดเป็นร้อยละ 92.5 ลักษณะของอาคารบ้านเรือนมีลักษณะเป็นบ้านเดี่ยวมีบริเวณ คิดเป็นร้อยละ 30.4 โดยอาชีพหลักของกลุ่มตัวอย่างในชุมชน คือ ทำสวนยางพารา/ปาล์มน้ำมัน คิดเป็นร้อยละ 77.5 กลุ่มตัวอย่างในพื้นที่ชุมชนมีการกู้หนี้ยืมสิน คิดเป็นร้อยละ 81.7 โดยแหล่งที่กู้หนี้ยืมสิน คือ กองทุนหมู่บ้าน คิดเป็นร้อยละ 47.9 ซึ่งเหตุผลส่วนใหญ่ที่ต้องการกู้หนี้ยืมสิน เพื่อซื้อปัจจัยการผลิต/เมล็ดพันธุ์พืชต่างๆ คิดเป็นร้อยละ 62.0 โดยสมาชิกในชุมชนทราบว่าในชุมชนของตนเองนั้นมีผู้รู้ท้องถิ่น/ปราชญ์ชุมชน คิดเป็นร้อยละ 66.1 โดยประเภทขององค์ความรู้หรือภูมิปัญญา คือ การทำเกษตรกรรม (สวนยางพารา/สวนผลไม้/เกษตรอินทรีย์) คิดเป็นร้อยละ 42.3 กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ทราบถึงองค์ความรู้และภูมิปัญญาชุมชนในด้านการเฝ้าระวังและเตือนภัยธรรมชาติของชุมชนแบบดั้งเดิม คิดเป็นร้อยละ 70.5 โดยสมาชิกในชุมชนมีความคิดเห็นว่าประเด็นปัญหาที่เกิดขึ้นในพื้นที่อย่างรุนแรง หรือประเด็นที่มีความเสี่ยงต่อชุมชนมากที่สุด คือ ปัญหาการบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ คิดเป็นร้อยละ 53.9

2. ความรู้ความเข้าใจในด้านสิ่งแวดล้อม/การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภัยธรรมชาติ

จากผลการศึกษาในเรื่องของความรู้ความเข้าใจด้านสิ่งแวดล้อม/การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภัยธรรมชาติ พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง มีความรู้ความ

เข้าใจอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.73 ซึ่งโดยส่วนใหญ่มีความรู้ความเข้าใจในองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ การอนุรักษ์ดินและน้ำ การทำเกษตรอินทรีย์ คิดเป็นร้อยละ 95

3. การรับรู้ข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสถานภาพของทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในท้องถิ่น

จากการศึกษา พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีการรับทราบสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสถานภาพของทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในท้องถิ่น คิดเป็นร้อยละ 72.0 โดยแหล่งที่มาจากผู้นำชุมชน คิดเป็นร้อยละ 39.1 ความถี่ในการได้รับข้อมูลข่าวสารด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในท้องถิ่น คือ เดือนละครั้ง คิดเป็นร้อยละ 45.4 โดยส่วนใหญ่มีการเข้ารับการอบรมหรือเพิ่มพูนความรู้ คิดเป็นร้อยละ 68.2 ส่วนใหญ่เคยเข้าร่วมกิจกรรมการอนุรักษ์ฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติในท้องถิ่น คิดเป็นร้อยละ 75.2 กิจกรรมที่ทำ คือ การทำฝายชะลอน้ำ คิดเป็นร้อยละ 41.9 และส่วนใหญ่มีความเห็นว่าควรจะมีการประชาสัมพันธ์ข่าวสารเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสถานการณ์ด้านการใช้ประโยชน์ที่ดิน และการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในท้องถิ่นผ่านทางผู้นำชุมชน คิดเป็นร้อยละ 75.2 โดยส่วนใหญ่สมาชิกในชุมชนมีการเข้าไปใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวภาพ คิดเป็นร้อยละ 76.4 รูปแบบของการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวภาพ คือ เป็นแหล่งอาหารเพื่อความมั่นคง คิดเป็นร้อยละ 67.8

4. การมีส่วนร่วมของชุมชนที่มีต่อการเข้าร่วมกิจกรรมด้านการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

จากผลการศึกษาการมีส่วนร่วมของชุมชนที่มีต่อการเข้าร่วมกิจกรรมด้านการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยแบ่งออกเป็น 3 ด้าน พบว่า ด้านที่ 1) ประสบการณ์ในการเข้าร่วมกิจกรรมของชุมชน ที่มีต่อการเข้าร่วมกิจกรรมด้านการคุ้มครอง/อนุรักษ์/ฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กลุ่มตัวอย่างในชุมชนส่วนใหญ่มีส่วนร่วมต่อการเข้าร่วมกิจกรรม ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.45) ด้านที่ 2) ความต้องการมีส่วนร่วมของชุมชนที่มีต่อการเข้าร่วมกิจกรรมด้านการคุ้มครอง/อนุรักษ์/ฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กลุ่มตัวอย่างในชุมชนส่วนใหญ่มีความต้องการมีส่วนร่วมต่อการเข้าร่วมกิจกรรม ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.75) และ ด้านที่ 3) ข้อจำกัดหรือปัญหาอุปสรรคของชุมชนที่มีต่อการเข้าร่วมกิจกรรมด้านการคุ้มครอง/อนุรักษ์/ฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กลุ่มตัวอย่างในชุมชนส่วนใหญ่มีความคิดเห็นว่าข้อจำกัดหรือปัญหาอุปสรรคของชุมชนที่มีต่อการเข้าร่วมกิจกรรม อยู่ในระดับปานกลาง (ค่าเฉลี่ย 2.76)

5. การยอมรับต่อการปรับตัว และเตรียมความพร้อมของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง

จากผลการวิเคราะห์ในเรื่องของการยอมรับต่อการปรับตัว/เตรียมความพร้อมของชุมชนต่อ การบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ยอมรับต่อการปรับตัว คิดเป็นร้อยละ 87.5 โดยสาเหตุของการยอมรับต่อการปรับตัว/เตรียมความพร้อมของชุมชน คือ ทำให้เกิดผลดีต่อการใช้ประโยชน์ที่ดินให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ชุมชน คิดเป็นร้อยละ 35.9 สำหรับแรงจูงใจที่มีผลต่อการปรับตัว/เตรียมความพร้อมของชุมชน คือ ต้องการมีทรัพยากรฯเพื่อการดำรงชีพ/ใช้ประโยชน์อย่างเพียงพอและยั่งยืน คิดเป็นร้อยละ 52.1 สำหรับแนวทางในการพัฒนาที่เหมาะสมกับสภาพชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง พบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ ต้องการให้ชุมชน/ผู้นำชุมชนเข้ามามีส่วนร่วมในการแก้ไขปัญหาร่วมกับภาครัฐ คิดเป็นร้อยละ 65. 8 โดยแนวทางในการการ

ปรับตัว/เตรียมความพร้อมของชุมชน คือ การพัฒนาและเพิ่มพูนทักษะอาชีพเพื่อเพิ่มรายได้/ส่งเสริมอาชีพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมคิดเป็นร้อยละ 43.7

6. การประเมินระดับศักยภาพของชุมชนเพื่อนำไปสู่การพัฒนาชุมชนที่เข้มแข็งและสามารถปรับตัวต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนนี้เป็นการประเมินระดับศักยภาพของชุมชนเพื่อนำไปสู่การพัฒนาชุมชนที่เข้มแข็งและสามารถปรับตัวต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง พบว่า ส่วนใหญ่ชุมชนมีระดับของศักยภาพของชุมชนเพื่อนำไปสู่การพัฒนาชุมชนที่เข้มแข็งและสามารถปรับตัวต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย มีศักยภาพของชุมชนในระดับมาก (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.21) เนื่องจากว่า ชุมชนในพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง ได้ตระหนักและเห็นถึงความสำคัญต่อการดูแลรักษาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เพื่อให้เป็นแหล่งต้นน้ำลำธาร โดยมีการการจัดตั้งกลุ่มเครือข่ายอนุรักษ์ป่าต้นน้ำ กลุ่มเกษตรอินทรีย์ การดำเนินกิจกรรมด้านการอนุรักษ์ ฟื้นฟู ระบบนิเวศป่าต้นน้ำ โดยมีเจ้าหน้าที่อุทยานแห่งชาติเขาปู-เขาย่า หน่วยพิทักษ์อุทยานต่างๆ ของจังหวัดพัทลุง และหน่วยงานในระดับท้องถิ่นให้การสนับสนุนกิจกรรมด้านการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง

7. การทดสอบสมมุติฐาน

ผลจากการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพยอม จังหวัดพัทลุง โดยใช้สถิติค่า t-test และการวิเคราะห์ความแปรปรวน F-test แบบ One-way ANOVA พบว่า ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 มีดังนี้

1. เพศ (t = 1.021; P-value = 0.083) โดย เพศมีไม่ผลต่อการปรับตัวต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.49 และ 1.23 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในสังคมปัจจุบันให้โอกาสเพศหญิงมีบทบาทในการแสดงความคิดเห็น และขับเคลื่อนกิจกรรมต่างๆ ในชุมชนมากขึ้น

2. สถานภาพในชุมชน (t = 2.452; P-value = 0.004) โดยกลุ่มที่เป็นผู้นำชุมชนมีการปรับตัวมากกว่าลูกบ้าน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.28 และ 1.57 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการดำเนินงานของชุมชนส่วนใหญ่นั้น ริเริ่มโดยผู้นำชุมชน และลูกบ้านส่วนใหญ่เชื่อฟังและให้ความเคารพต่อความคิดเห็นของผู้นำชุมชน รวมทั้งข้อมูลข่าวสารต่างๆ ส่งผ่านมายังผู้นำชุมชนก่อน ดังนั้นผู้ที่มีสถานภาพเป็นผู้นำชุมชนจึงมีการมีส่วนร่วมมากกว่าลูกบ้าน

3. ระดับการศึกษา (F = 0.728; P-value = 0.572) โดยระดับการศึกษาไม่มีผลต่อการปรับตัว ทั้งนี้เนื่องจากในชุมชนส่วนใหญ่ผู้ที่มีระดับการศึกษาสูงมีน้อย ส่วนใหญ่มีระดับการศึกษาในระดับประถมศึกษา จึงไม่มีผลต่อบทบาทในการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำ

4. อาชีพหลัก (t = -2.006; P-value = 0.046) โดยกลุ่มที่กลุ่มที่มีอาชีพในภาคเกษตรกรรมมีการปรับตัวมากกว่ากลุ่มนอกภาคเกษตรกรรม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.24 และ 3.11 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มที่มีอาชีพภาคเกษตรกรรมต้องพึ่งพิงและใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติ โดยเฉพาะทรัพยากรน้ำ ทรัพยากรดิน และทรัพยากรป่าไม้มากกว่าผู้ที่อยู่นอกภาคเกษตรกรรม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการใช้ทรัพยากรธรรมชาติน้อยกว่าหรือไม่ได้ใช้เลย

5. การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวภาพในลุ่มน้ำ (t = -1.229; P-value = 0.000) โดยกลุ่มที่มีการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวภาพในลุ่มน้ำมีการปรับตัวมากกว่ากลุ่มที่ไม่มีการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวภาพในลุ่มน้ำ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.70 และ 1.62 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างที่มีการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวภาพในลุ่มน้ำ ย่อมมีความรู้สึกผูกพันต่อทรัพยากรที่มีอยู่ในท้องถิ่น จึงเห็นความสำคัญของทรัพยากรในลุ่มน้ำ และมีส่วนร่วมในการทำกิจกรรมด้านการอนุรักษ์ต่างๆ มากกว่ากลุ่มที่ไม่มีการใช้ประโยชน์ใดๆ

6. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม (t = 2.564; P-value = 0.000) โดยกลุ่มที่มีความรู้ความเข้าใจมาก มีการปรับตัวมากกว่ากลุ่มที่มีความรู้ความเข้าใจน้อย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.82 และ 1.40 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างที่มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมในระดับมาก ย่อมมีความรู้เรื่องผลกระทบจากการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรในลุ่มน้ำที่ไม่ถูกต้องตามหลักการอนุรักษ์มากกว่าคนที่มีความรู้ในระดับน้อย

7. การรับรู้ข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม (t = 4.521; P-value = 0.000) โดยกลุ่มที่มีการรับรู้ข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จะมีการปรับตัวมากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับข้อมูลข่าวสาร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.64 และ 1.38 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากผู้ที่ได้รับข้อมูลข่าวสาร ทำให้รับทราบสถานภาพและประเด็นปัญหาของทรัพยากรในพื้นที่ลุ่มน้ำ ย่อมมีความสนใจและตระหนักถึงปัญญา และมีความต้องการที่จะเข้าร่วมกิจกรรมในการแก้ไขปัญหามากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับรู้ข้อมูลข่าวสาร

8. ศักยภาพและทุนทางสังคมของชุมชน (F = 1.949; P-value = 0.038) โดยกลุ่มที่มีศักยภาพมากมีการปรับตัวมากกว่ากลุ่มที่มีระดับศักยภาพปานกลาง และกลุ่มที่มีระดับศักยภาพน้อย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.73, 1.57 และ 1.46 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มบุคคลที่มีศักยภาพสูงนั้น ย่อมมีจิตสำนึก และเห็นคุณค่าและความสำคัญของทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในลุ่มน้ำ มากกว่ากลุ่มบุคคลที่มีระดับศักยภาพปานกลางและระดับศักยภาพน้อย ส่งผลทำให้กลุ่มบุคคลดังกล่าวนั้นมีส่วนร่วมในการบริหารจัดการพื้นที่ลุ่มน้ำมากกว่า (Table 1) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ วรารัตน์ (2553) ที่ได้วิจัยปัจจัยที่มีต่อบทบาทของชุมชนในการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่ต้นน้ำ กรณีศึกษาชุมชนบ้านถ้ำผึ้ง ตำบลต้นยวน อำเภอพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยพบว่า ปัจจัยด้านการเป็นสมาชิกกลุ่ม ภูมิลำเนาเดิม และความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติมีความสัมพันธ์กับบทบาทการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่ต้นน้ำ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เนื่องจากชุมชนในพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ส่วนใหญ่เป็นชุมชนแบบกึ่งชนบทและตั้งถิ่นฐานในพื้นที่สูง และมีการปลูกยางพาราเป็นอาชีพหลัง ซึ่งมีความผูกพันกับการอนุรักษ์พื้นที่และการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวภาพในท้องถิ่น

Table 1 Summary of hypothesis testing.

Independent Variables	t-test	F-test	P-value
1. sex	1.021		0.083^{ns}
2. community status	2.452		0.004*
3. education		0.728	0.572^{ns}
4. occupation	-2.006		0.046*
5. bioresources utilization in Watershed	-1.229		0.000*
6. knowledge of natural resources and environment	2.564		0.000*
7. information perception	4.521		0.000*
8. community potential and social capital		1.949	0.038*

Remarks: * Significant difference

^{ns} Non - significant difference

8. บทบาทของนักวิจัยชุมชนในการมีส่วนร่วมในการวางแผนบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย

ผลการทดสอบความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมของนักวิจัยชุมชนในพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง จำนวน 40 คน ทั้งก่อนและหลังการอบรมพัฒนาศักยภาพการเป็นนักวิจัยชุมชน พบว่า ค่าเฉลี่ยหลังการฝึกอบรม (0.94) มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยก่อนฝึกอบรม (0.70) สรุปได้ว่า หลังการอบรมทำให้อาสาสมัครนักวิจัยชุมชนมีความรู้เพิ่มขึ้น สำหรับความรู้ที่ได้ถ่ายทอดให้กับนักวิจัยชุมชน ได้แก่ ความรู้เกี่ยวกับการอนุรักษ์และจัดการทรัพยากรในพื้นที่ลุ่มน้ำ การส่งเสริมภูมิปัญญาท้องถิ่น และการส่งเสริมการทำเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมตลอดจนการจัดทำแผนปฏิบัติการชุมชนในการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำแบบมีส่วนร่วม นอกจากนี้ ยังส่งเสริมให้เกิดการริเริ่มกิจกรรมนำร่องในระดับชุมชน โดยกิจกรรมที่ชุมชนได้ดำเนินการร่วมกัน คือ กิจกรรมการฟื้นฟูระบบนิเวศป่าต้นน้ำ การสร้างฝายชะลอน้ำ และการส่งเสริมการเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นกิจกรรมที่สอดคล้องกับวิถีชีวิตและความต้องการของชุมชน

9. ผลการจัดทำแผนปฏิบัติการชุมชนในการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย

ผลการจัดทำแผนปฏิบัติการชุมชนในการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง โดยมีสาระที่สำคัญ ดังนี้

1. ให้ชุมชนมีการประเมินความเสี่ยงด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ตลอดจนความเสี่ยงภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในท้องถิ่น

2. การประชาสัมพันธ์เพื่อสื่อสารความเสี่ยงด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม/ความเสี่ยงภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในท้องถิ่น ให้กับสมาชิกในชุมชน กลุ่มเกษตรกร กลุ่มองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และกลุ่มเจ้าหน้าที่รัฐได้รับทราบเพื่อเตรียมความพร้อมในการรับมือกับปัญหาที่จะเกิดขึ้นร่วมกัน

3. การประเมินขีดความสามารถของชุมชน ในการเตรียมความพร้อมรับมือกับความเสี่ยงด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม/ความเสี่ยงภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในท้องถิ่น โดยพิจารณาถึง อาชีพ ความรู้ความเข้าใจด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม/ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และภัยธรรมชาติ ภูมิปัญญาท้องถิ่น และการสนับสนุนจากภาครัฐ

4. พัฒนาศักยภาพของชุมชนในการปรับตัว และเตรียมความพร้อมด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม/ความเสี่ยงภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในท้องถิ่น โดยการพัฒนาให้เกิดพื้นที่ต้นแบบ หรือพื้นที่สาธิตนำร่องในระดับชุมชน

5. การฟื้นฟูระบบนิเวศป่าต้นน้ำ และแหล่งน้ำในชุมชนให้มีศักยภาพในการกักเก็บน้ำเพื่อการใช้ประโยชน์ โดยการสร้างฝายชะลอน้ำ การปลูกต้นไม้ การขุดลอก การจัดสรรน้ำ และการสร้างกติกาในการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติของชุมชน

6. การจัดตั้งเครือข่ายอาสาสมัครนักวิจัยชุมชนและการพัฒนาขีดความสามารถ เพื่อการประชาสัมพันธ์แจ้งข่าวสาร และเตือนภัยสถานการณ์ด้านทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม/ภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในท้องถิ่น

สรุป

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสถานภาพด้านเศรษฐกิจสังคมและการใช้ทรัพยากรในลุ่มน้ำ รวมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย โดยใช้การวิจัยเชิงสำรวจ ร่วมกับการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม และการพัฒนาศักยภาพนักวิจัยชุมชนในการสนับสนุนกระบวนการจัดทำแผนปฏิบัติการเพื่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำโดยชุมชนมีส่วนร่วม ผลการวิจัย ยืนยันให้เห็นถึงความเสี่ยงของลุ่มน้ำที่เกิดจากกิจกรรมการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่ต้นน้ำ ถึงแม้ว่าชุมชนจะมีระดับการส่วนร่วมในกิจกรรมการอนุรักษ์/ฟื้นฟูลุ่มน้ำระดับมาก ก็ยังมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่หน่วยงานภาครัฐต้องสนับสนุนให้เกิดการจัดทำแผนปฏิบัติการระดับชุมชนในการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำ และส่งเสริมสนับสนุนองค์ความรู้ในเรื่องของการทำเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการประยุกต์ใช้องค์ความรู้ของท้องถิ่น ที่สอดคล้องกับบริบทของพื้นที่ชุมชน โดยปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการปรับตัวของชุมชนต่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง ได้แก่ สถานภาพในชุมชน อาชีพหลัก การใช้ประโยชน์จากทรัพยากรชีวภาพในลุ่มน้ำ ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม การรับรู้ข้อมูลข่าวสาร รวมทั้งศักยภาพและทุนทางสังคมของชุมชน ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญกับงานส่งเสริมศักยภาพของชุมชนโดยใช้ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ ควบคู่กับการเสริมสร้างความเข้มแข็งของผู้นำชุมชน เครือข่ายอาสาสมัครนักวิจัยชุมชน และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ในการบูรณาการความร่วมมือเพื่อการบริหารจัดการพื้นที่ต้นน้ำทะเลน้อย ตำบลเกาะเต่า อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง

เอกสารอ้างอิง

กิติชัย รัตนะ. 2549. **การมีส่วนร่วมในการจัดการลุ่มน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

บุญธรรม กิจปรีดาบริสุทธิ์. 2531. **ระเบียบวิธีการวิจัยทางสังคมศาสตร์**. คณะสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ.

ผ่องพรรณ ตรัยมงคลกูล และสุภาพ ฉัตราภรณ์. 2545. **การออกแบบการวิจัย**. พิมพ์ครั้งที่ 4 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,กรุงเทพฯ.

วรารัตน์ วัฒนชโนบล. 2553. **ปัจจัยที่มีต่อบทบาทของชุมชนในการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่ต้นน้ำ กรณีศึกษาชุมชนบ้านถ้ำผึ้ง ตำบลต้นยวน อำเภอพนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิชา นิยม และกิติชัย รัตนะ. 2547. **การบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเชิงบูรณาการ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สิน พันธุ์พินิจ. 2547. **เทคนิคการวิจัยทางสังคมศาสตร์**. บริษัท จุนพับลิชชิ่ง จำกัด, กรุงเทพฯ.

สุชาติ ประสิทธิรัฐสินธุ์. 2540. **ระเบียบวิธีวิจัยทางสังคมศาสตร์**. สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุภางค์ จันทวานิช. 2545. **วิธีการวิจัยเชิงคุณภาพ**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Bechstedt, H. 1997. **Participatory Research and Technology Development**. A Training Manual based on a Workshop held from 26 May to 3 June, 1997 in Chiang Mai, Thailand.

Mills, G. E. 2000. **Action Research: A Guide for the Teacher Researcher**. Prentice-Hall, Ohio.

Whyte, F. W. 1991. **Participatory Action Research**. Sag Publication, London.

Yamane, T. 1973. **Statistics: An Introductory Analysis**. 3 rd ed., Harper International Edition, Tokyo.

การกำจัดพร้อมกันของธาตุอาหารในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เถ้าลอยถ่านหินที่ปรับปรุงด้วยวิธีเคมี

Simultaneous Removal of Nutrients from Synthetic Wastewater by Chemically-Treated Coal Fly Ash

ทิพากร สีวอ และ ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ

Thiphakorn Siwo and Patthra Pengthamkeerati

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดพร้อมกันของธาตุอาหารในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เถ้าลอยถ่านหิน (CFA) และ เถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายเบส (TCFA-NaOH) การศึกษาแบบกะทำเพื่อวิเคราะห์ผลของ ความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุอาหารและ ไอโซเทอมของการดูดซับ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียมและฟอสเฟตในสารละลายธาตุอาหารทำให้ความสามารถในการดูดซับของเถ้าลอยสองชนิดเพิ่มสูงขึ้น โดย TCFA-NaOH สามารถดูดซับแอมโมเนียมและฟอสเฟตได้ 3.90 mg N g^{-1} และ 113.64 mg P g^{-1} ซึ่งมากกว่า CFA ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ 0.90 mg N g^{-1} และ 40.65 mg P g^{-1} ทั้งนี้คาดว่าเป็นเพราะการกระตุ้นเถ้าลอยถ่านหินด้วยสารละลายเบสทำให้โครงสร้างของเถ้าลอยเปลี่ยนเป็นวัสดุที่ลักษณะคล้ายซีโอไลต์ การดูดซับฟอสเฟตด้วย CFA และ TCFA-NaOH สอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช ดังนั้นเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับธาตุอาหารในระบบบำบัดน้ำเสียได้

ABSTRACT

This study investigated the simultaneous removal of nutrients in the synthetic wastewater by using coal fly ash (CFA) and alkaline-treated CFA (TCFA-NaOH). Batch experiment was conducted to determine the effect of initial nutrient concentrations and adsorption isotherm. Results showed that with an increase of ammonium and phosphate concentrations, nutrient adsorption capacities of CFA and TCFA-NaOH were increased. TCFA-NaOH had a removal efficiency of 3.90 mg N g^{-1} and 113.64 mg P g^{-1}, which were higher than that of the CFA with 0.90 mg N g^{-1} and 40.65 mg P g^{-1}. These higher efficiencies may be because treating CFA with alkaline solution transformed to zeolite-like material. Equilibrium data of CFA and TCFA-NaOH fitted well with the Langmuir model than the Freundlich model. Hence, TCFA-NaOH can be used as an alternative adsorbent and be further developed for treating nutrients in wastewater treatment.

Key Words: Fly ash, Nutrient, Simultaneous removal, wastewater treatment

* Corresponding author; e-mail address: siwo_t@hotmail.com

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 1090

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การปนเปื้อนของธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งซึ่งอยู่ในรูปของแอมโมเนียมและฟอสเฟตเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชั่นเมื่อลงสู่แหล่งน้ำ ดังนั้นการบำบัดธาตุอาหารดังกล่าวก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งธาตุอาหารเหล่านี้สามารถกำจัดได้หลายวิธี เช่น การบำบัดทางเคมี ไนตริฟิเคชั่น-ดีไนตริฟิเคชั่นทางชีวภาพ และการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับการดูดซับแอมโมเนียม ส่วนการกำจัดฟอสเฟตนิยมใช้วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี การดูดซับ และการกำจัดทางชีวภาพ (Yin and Kong, 2014) การดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมและได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย วัสดุที่ใช้ดูดซับมีความหลากหลายและราคาถูก (Ali *et al*., 2012) ปัจจุบันมีการการพัฒนาวัสดุที่ใช้ดูดซับจากธรรมชาติและขยะอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย เถ้าลอยถ่านหินเป็นวัสดุที่สามารถพัฒนาให้เป็นวัสดุที่สามารถดูดซับได้ เนื่องจากเถ้าลอยถ่านหินมีออกไซด์ของซิลิกอน (SiO_2) และอะลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถเปลี่ยนเป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายซีโอไลต์ (Pengthamkeerati *et al*., 2008)

การศึกษานี้มีแนวคิดที่จะใช้เถ้าลอยถ่านหินในการกำจัดธาตุอาหารแอมโมเนียมและฟอสเฟตออกจากน้ำเสียโดยนำเถ้าลอยถ่านหินมาดูดซับโดยตรง และปรับสภาพให้มีลักษณะคล้ายซีโอไลต์เพื่อจะทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมและฟอสเฟตได้ดียิ่งขึ้น และมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบผลของการกระตุ้นเถ้าลอยด้วยสารละลายเบสที่มีต่อความสามารถและพฤติกรรมการกำจัดธาตุอาหารแอมโมเนียมและฟอสเฟต

อุปกรณ์และวิธีการ

การกระตุ้นเถ้าลอยถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นเถ้าลอยที่เหลือจากการกระบวนการเผาไหม้ของการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยนำมาอบให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นแบ่งเถ้าลอยส่วนหนึ่งมากระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 M กวนผสมในอัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย 1: 10 บ่มด้วยความร้อน 100 °C ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองเถ้าลอยที่กระตุ้นแล้วผ่านกระดาษกรองเบอร์ 40 (Whatman No.40) ล้างเถ้าลอยด้วยน้ำกลั่น จน pH ของน้ำที่ไหลผ่านการกรองมีค่าคงที่หรือเกือบคงที่ อบเถ้าลอยที่กรองได้ด้วยอุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงให้เย็นในเดซิคเคเตอร์ จากนั้นเก็บในภาชนะปิดเพื่อป้องกันความชื้นจนกว่าจะนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

การดูดซับแอมโมเนียมและฟอสเฟตด้วยเถ้าลอยถ่านหิน

เตรียมสารละลายธาตุอาหารจาก NH_4Cl และ KH_2PO_4 โดยแปรผันความเข้มข้นของ แอมโมเนียม-ไนโตรเจนต่อ ฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส อยู่ในช่วง 0:0, 25:50, 50:100, 100:250, 250:500, 500:1,000, 750:2,500, 1,000:5,000 และ 1,200:10,000 mg L^{-1} เติมเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายเบส ตัวอย่างละ 1.0 g ลงในขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 3 ซ้ำ กวนผสมให้เข้ากันตลอดเวลาด้วยเครื่องเขย่าให้เกิดการดูดซับเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบในการเขย่า 140 rpm ที่อุณหภูมิห้อง วัด pH เริ่มต้นและสภาวะสมดุล เมื่อครบกำหนดเวลา นำมากรอง แยกส่วนสารสารละลายที่ได้วิเคราะห์ไนโตรเจนในรูปของ ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen: TKN) และวิเคราะห์ฟอสฟอรัสด้วยวิธี Molybdenum blue ascorbic acid

การคำนวณความสามารถในการดูดซับคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$q_e = (C_o - C_e)V/ W \quad (1)$$

เมื่อ q_e (mg g^{-1}) คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล

C_o (mg L^{-1}) คือ ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารเริ่มต้น

C_e (mg L^{-1}) คือ ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่สภาวะสมดุล

V (L) คือ ปริมาตรของสารละลายธาตุอาหาร

W(g) คือ ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ดูดซับ

รูปแบบไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm)

จากการศึกษาแปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุอาหารในน้ำเสียสังเคราะห์ เติมเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายเบสตัวอย่างละ 1.0 g ลงในขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 3 ซ้ำ กวนผสมให้เข้ากันตลอดเวลาด้วยเครื่องเขย่าให้เกิดการดูดซับเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบในการเขย่า 140 rpm ที่อุณหภูมิห้อง นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ในรูปแบบของแบบจำลองแลงเมียร์ และฟรุนดลิชไอโซเทอม จากนั้นทำการคาดการณ์เส้นกราฟด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้น และเมื่อได้สมการแล้วให้นำมาหาค่าตัวแปรที่ต้องการ

ผลและวิจารณ์

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียมและฟอสเฟต

การกำจัดพร้อมกันของแอมโมเนียมและฟอสเฟตด้วยการดูดซับของเถ้าลอยสองชนิด ศึกษาจากสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแอมโมเนียมในช่วง 0 - 750 mg L^{-1} และฟอสเฟตในช่วง 0 – 10,000 mg L^{-1} ผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียม เพิ่มขึ้นเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นด้วยเบสดูดซับได้ดีขึ้นและมากที่สุด 5.59 mg g^{-1} ที่ความเข้มข้น 250 mg L^{-1} เถ้าลอยถ่านหินเริ่มต้น 1.98 mg g^{-1} ที่ความเข้มข้น 50 mg l^{-1} (Figure 1a) เนื่องจากกลไกของการดูดซับแอมโมเนียมเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนของประจุบวกบนพื้นผิวของเถ้าลอย โดยเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นมีค่า CEC และค่า SSA มากกว่าเถ้าลอยเริ่มต้น ในขณะที่การดูดซับฟอสเฟต ของเถ้าลอยทั้งสองชนิดสามารถดูดซับได้ดีขึ้น โดยเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นดูดซับได้ดีที่สุด 126.22 mg g^{-1} ที่ความเข้มข้น 5,000 mg L^{-1} หลังจากนั้นการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความเข้มข้น (Figure 1b)

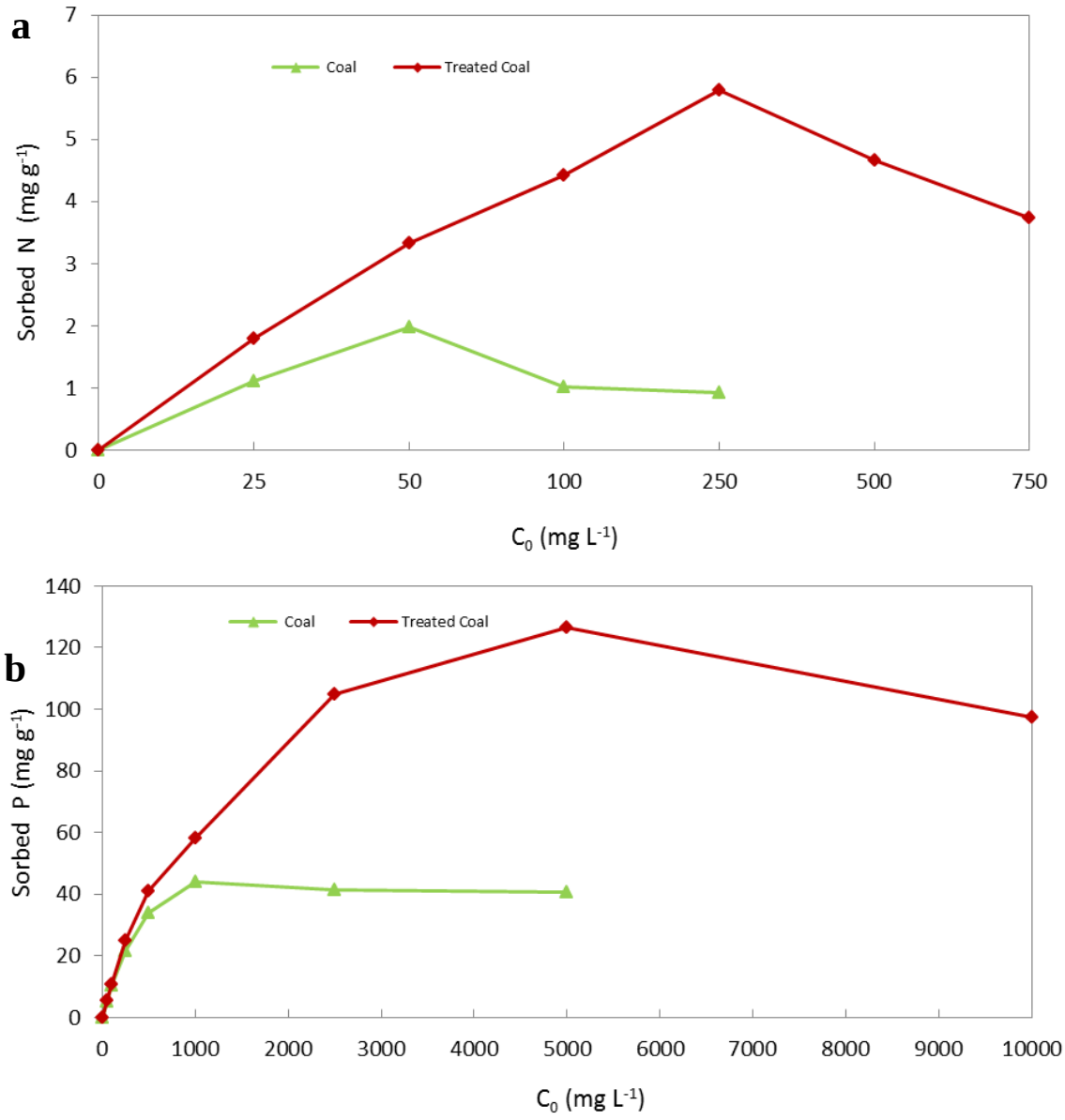


Figure 1 Effect of initial concentration on (a)ammonium removal (b)phosphate removal by coal and treated coal fly ash. Experiment condition: fly ash dose 10% w/v; contact time 24 h.

อย่างไรก็ตามการกำจัดพร้อมกันของแอมโมเนียมและฟอสเฟตในสารละลาย แอมโมเนียมถูกดูดซับด้วยเถ้าลอยทุกชนิดได้น้อยเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตอาจเนื่องจาก ฟอสเฟตถูกเตรียมจาก KH_2PO_4 ทำให้มี K^+ (Ji *et al*., 2015) และในสารละลายธาตุอาหารที่ความเข้มข้นสูง จาก Table 1 ค่า pH ที่สภาวะสมดุลมีค่าน้อยค่อนไปทางกรดทำให้เกิด H^+ ในสารละลายสามารถเกิดการแข่งขันแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างประจุบวกกับ NH_4^+ ในตำแหน่งของการดูดซับบนพื้นผิวของเถ้าลอย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang *et al*. (2011) ได้ศึกษาการดูดซับแอมโมเนียมจากน้ำเสียด้วยเถ้าลอยที่กระตุ้นด้วยวิธี alkaline fusion พบว่าค่า pH ที่ 8 เป็นค่าที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียม เมื่อค่า pH ต่ำลงทำให้ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียมลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของ H^+ มีมากขึ้นและถูกดูดซับบนพื้นผิวของเถ้าลอยด้วย ที่ pH ในช่วงที่เป็นเบสเกินไป แอมโมเนียมเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็น NH_3 ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้ด้วยเถ้าลอย

Table 1 The pH values of aqueous solution (ammonium and phosphate) after nutrient removal by CFA and TCFA-NaOH.

N:P (mg L^{-1})	25:50	50:100	100:250	250:500	500:1000	750:2500	1000:5000	1200:10000
CFA	7.9	8.1	8.0	7.6	6.3	6.0	5.6	-
TCFA-NaOH	8.2	8.2	8.2	7.9	7.4	6.8	6.3	5.9

ไอโซเทอมของการดูดซับแอมโมเนียมและฟอสเฟต

ไอโซเทอมของการดูดซับใช้อธิบายลักษณะการดูดซับแอมโมเนียมและฟอสเฟตของเถ้าลอยถ่านหินเริ่มต้นและเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแอมโมเนียมและฟอสเฟตที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอยกับความเข้มข้นของแอมโมเนียมและฟอสเฟตที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการที่ (2) (Langmuir, 1918)

$$C_e/q_e = 1/(Q_0 K_L) + (1/Q_0)C_e \quad (2)$$

เมื่อ q_e (mg g^{-1}) คือ ปริมาณแอมโมเนียมหรือฟอสเฟตที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย

C_e (mg L^{-1}) คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียมหรือฟอสเฟตที่สภาวะสมดุล

Q_0 (mg g^{-1}) คือ ปริมาณสูงสุดของแอมโมเนียมหรือฟอสเฟตที่สามารถถูกดูดซับแบบชั้นเดียวต่อปริมาณเถ้าลอย

K_L (L mg^{-1}) คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรงดัง Figure 2 และ Figure 3 โดยค่า Q_0 หาได้จากจุดตัดแกนตั้ง K_L เป็นค่าคงที่หาได้จากความชันของกราฟ

แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช เขียนได้ดังสมการที่ (3) (Freundlich, 1906)

$$\ln q_e = \ln K_F + (1/n) \ln C_e \quad (3)$$

เมื่อ K_F (L mg^{-1}) คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิช บอกถึงความสามารถในการดูดซับ

n คือ ค่าคงที่ที่บอกถึงความเข้มในการดูดซับ (adsorption intensity) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1-10 แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี

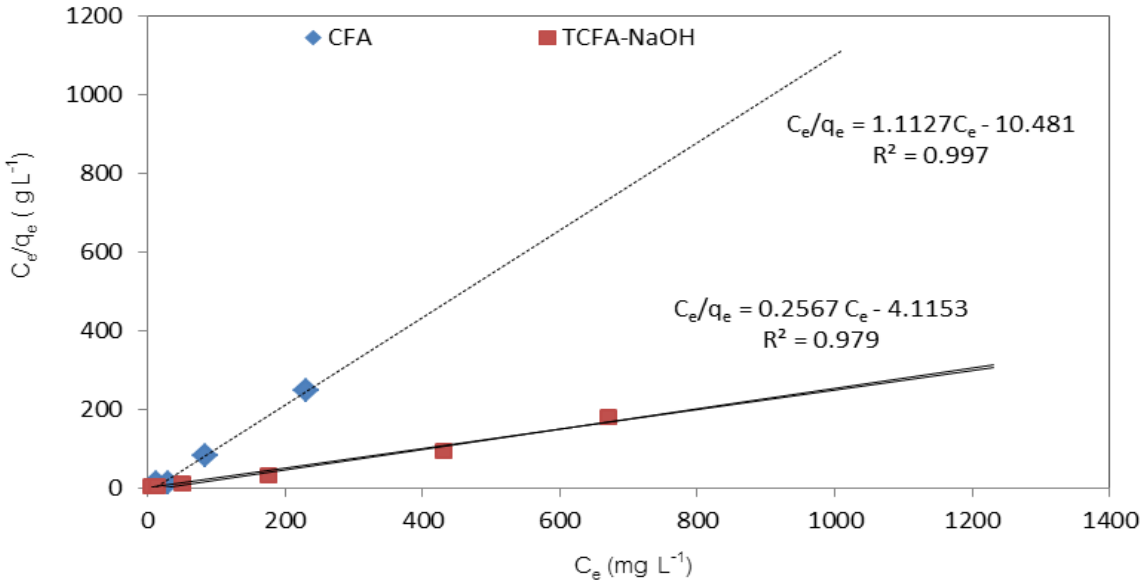


Figure 2 Langmuir isotherm of ammonium sorption by coal fly ash (CFA) and treated coal fly ash (TCFA-NaOH). Experiment condition: fly ash dose 10% w/v; contact time 24 h; initial N concentration range 0-1,200 mg l^{-1}.

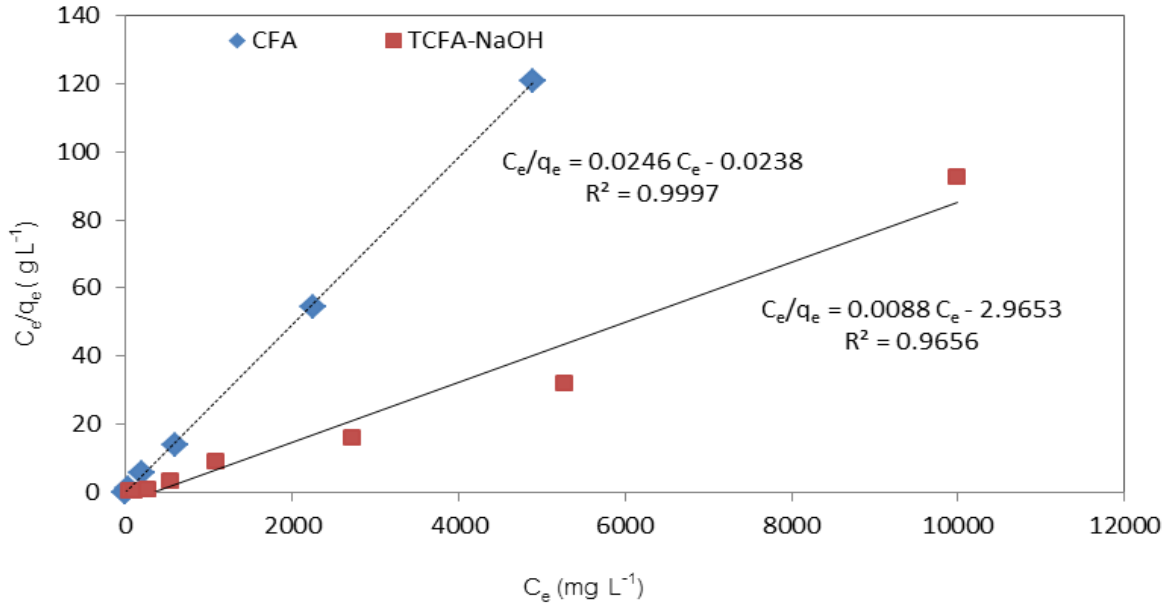


Figure 3 Langmuir isotherm of phosphate sorption by coal fly ash (CFA) and treated coal fly ash (TCFA-NaOH). Experiment condition: fly ash dose 10% w/v; contact time 24 h; initial P concentration range 0-10,000 mg L^{-1}.

ไอโซเทอมการดูดซับแอมโมเนียมและฟอสเฟตโดยใช้เถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยถ่านหินที่ถูกกระตุ้นนั้นสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยพิจารณาจากค่า R^2 ดังแสดงใน Table 2 อธิบายได้ว่าการดูดซับแอมโมเนียมหรือฟอสเฟตเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ความแตกต่างระหว่างพลังงานการดูดซับจะไม่ขึ้นกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ

Table 2 The Q_0 and K_L values for the Langmuir isotherm, the K_F and n values for the Freundlich isotherm.

Fly ash		Langmuir			Freundlich		
		Q_0 (mg g^{-1})	K_L (Lmg^{-1})	R^2	K_F	n	R^2
CFA	N	0.90	-0.11	0.9970	2.10	-7.15	0.2649
	P	40.65	-1.03	0.9997	$1.26x10^{-7}$	0.16	0.9301
TCFA-NaOH	N	3.90	-0.06	0.9790	1.88	6.43	0.5106
	P	113.64	-0.003	0.9656	7.21	3.01	0.9468

จากผลการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมและฟอสเฟตสูงสุดของเถ้าลอยที่ถูกกระตุ้นดูดซับได้ 3.90 mg N g^{-1} และ 113.64 mg P g^{-1} ซึ่งมีประสิทภาพมากกว่าเถ้าลอยที่ดูดซับได้ 0.90 mg N g^{-1} และ 40.65 mg P g^{-1} เนื่องจากการกระตุ้นเถ้าลอยด้วย NaOH เป็นผลให้พื้นผิวจำเพาะ (Specific surface area; SSA) และค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity; CEC) ของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความพรุนและมีลักษณะเป็นซีโอไลต์ ซึ่งสามารถดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออนและจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิ์ภาพการดูดซับได้ ดังนั้นกลไกการดูดซับแอมโมเนียมจึงเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนบนพื้นผิวจำเพาะของเถ้าลอย ส่วนกลไกการดูดซับฟอสเฟตที่มีประสิทธิภาพการดูดซับได้มากกว่าเพราะสามารถเกิดได้ทั้งการแลกเปลี่ยนไอออนลบและการตกตะกอนโดย Ca และ Mg ที่เป็นองค์ประกอบในเถ้าลอย เช่น $Ca_3(PO_4)_2$ $Mg_3(PO_4)_2$ หรือ NH_4PO_4 (Zhang *et al*., 2013)

สรุป

การกระตุ้นเถ้าลอยถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เถ้าลอยมีประสิทธิภาพในการดูดซับพร้อมกันของแอมโมเนียมและฟอสเฟตมากขึ้นโดยเฉพาะฟอสเฟต จาก 40.65 mg P g^{-1} เป็น 113.64 mg P g^{-1} เนื่องจากการกระตุ้นเพิ่มพื้นที่ผิว และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้เถ้าลอยมีสมบัติการดูดซับได้ดี โดยกลไกของการกำจัดฟอสเฟตนั้นมีทั้งการดูดซับบนพื้นผิวภายนอกของเถ้าลอยและการตกตะกอนกับแคลเซียม แมกซีเซียม ในองค์ประกอบของเถ้าลอย ไอโซเทอมของการดูดซับพร้อมกันของแอมโมเนียมและฟอสเฟตด้วยเถ้าลอยทั้งสองชนิดสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอม ดังนั้นการกระตุ้นเถ้าลอยถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงเป็นวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมและฟอสเฟตและสามารถพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับธาตุอาหารในระบบบำบัดน้ำเสียได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Ali, I., M. Asim and T. A. Khan. 2012. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. **Journal of Environmental Management** 113: 170-183.

Freundlich, H.M.F. 1906. Uber die adsorption in losungen, Zeitschrift fur physikalische chemie. **Leipzig** 57A: 385-470.

Langmuir, L. 1918. The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum. **Journal of America Chemistry Society** 40:1361-1367.

Pengthamkeerati, P., T. Satapanajaru and P. Chularuengoaksorn. 2008. Chemical modification of coal fly ash for the removal of phosphate from aqueous solution. **Fuel** 87: 2469-2476.

Yin, H. and M. Kong. 2014. Simultaneous removal of ammonium and phosphate from eutrophic waters using natural calcium-rich attapulgite-based versatile adsorbent. **Desalination** 351: 128-137.

Ji, X., M. Zhang, Y. Wang, Y. Song, Y. Ke and Y. Wang. 2015. Immobilization of ammonium and phosphate in aqueous solution by zeolites synthesized from fly ashes with different compositions. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 22: 1-7.

Zhang, H., M. Zhang, D. Xu, L. Han, D. Nui, B. Tian, J. Zhang, L. Zhang and W. Wu. 2011. Removal of ammonium from aqueous solution using zeolite synthesized from fly ash by a fusion method. **Desalination** 271: 111-121.

Zhang, Z., J. Li, W. Khunjar and K. Zhao. 2013. Enhanced nutrient sequestration from swine wastewater using zeolite synthesized from fly ash integrated with surface amendment technique. **Fuel** 111: 57-65.

การเปรียบเทียบผลของการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) แบบผสมผสานในระบบปิดและแบบพัฒนาต่อคุณภาพน้ำ

Comparative Study between Closed Polyculture System and Intensive Culture System on the Water Quality of Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*)

ทิพย์วิภา มีไชย[1*] ภาสิณี วรชนะนันท์[1] พงศ์เชฏฐ์ พิชิตกุล[2]

Tipvipa Meechai[1*], Pasinee Worachananant[1], Phongchate Pichitkul[2]

บทคัดย่อ

การเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาที่มีการจัดการระบบการเลี้ยงที่ไม่เหมาะสม ส่งผลทำให้ของเสียตกค้างสะสมภายในบ่อ และส่งผลทำให้คุณภาพน้ำไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ดังนั้น จึงทำการศึกษารูปแบบการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมร่วมกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ เช่น ปลานิล ซึ่งเป็นการใช้ธรรมชาติบำบัด เพื่อรักษาคุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยง และเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบผลคุณภาพน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบผสมผสานร่วมกับปลานิลในระบบปิดและแบบพัฒนา (ชุดควบคุม) ที่มีการเลี้ยงแบบหนาแน่น โดยทำการเลี้ยงกุ้งระยะโพสลาร์วา 10-14 (PL 10-14) ในบ่อเพาะเลี้ยงขนาด 4 ไร่ ผลการศึกษาพบว่าการเลี้ยงกุ้งแบบผสมผสานร่วมกับปลานิลมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง และสามารถลดปริมาณแอมโมเนีย ไนเตรท ฟอสเฟต บีโอดี ในน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยลงสู่ธรรมชาติได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ABSTRACT

The intensive cultured of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) with inappropriate farming management culture system can accumulate waste residues within the pond and as a result of unsuitable water quality for shrimp growth. Accordingly, this study were focusing on the shrimp cultured together integrated with others creatures such as tilapia, which has been used as an natural treatment in order to maintained water quality during culture system and at the end of the culture. Comparative studied of water quality between closed polyculture system reared with tilapia and intensive culture system (control) were investigated. Shrimp at post larval stage 10-14 (PL 10-14) were cultured in pond around 4 rai. The result showed that the closed polyculture system reared with tilapia can improve the water quality in culture pond. It significantly decreased ammonia, nitrate, phosphate concentrations as well as biological oxygen demand (BOD) in effluent before released into natural water ($p < 0.05$).

Key Words: closed polyculture system, intensive culture system, *Litopenaeus vannamei*, water quality

* Corresponding author; e-mail address: tipvipaa.m@gmail.com

[1]ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[1]Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok10900

[2]ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[2]Department of Aquaculture, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การเลี้ยงกุ้งแบบพัฒนา (intensive culture system) เป็นที่นิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยผู้เลี้ยงจะทำการปล่อยกุ้งขาวแวนนาไมในอัตราความหนาแน่นสูงเพื่อต้องการเพิ่มปริมาณผลผลิตต่อไร่ให้สูงขึ้น ซึ่งในระหว่างการเลี้ยงจะเน้นการให้อาหารสำเร็จรูปในปริมาณมากและเน้นอาหารที่มีโปรตีนสูงเป็นหลัก ประกอบไปด้วย โปรตีนร้อยละ 40.0-50.0 ไขมันร้อยละ 6.0-7.5 ฟอสฟอรัสร้อยละ 1.5-2.0 ของน้ำหนักแห้งของอาหารและส่วนประกอบต่างๆ อีกหลายชนิด (ธีรยุทธ, 2551) จึงเกิดของเสียตกค้างภายในบ่อจากการขับถ่ายของกุ้งและเศษอาหารที่เหลือจากการกิน โดยของเสียเหล่านี้จะเกิดการย่อยสลายโดยกระบวนการย่อยสลายที่มีออกซิเจนและการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน เมื่อน้ำทิ้งและตะกอนเลนถูกปล่อยทิ้งในลำคลองสาธารณะหรือแหล่งน้ำทางธรรมชาติจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำ ซึ่งอาจจะมีผลต่อเนื่องถึงระบบนิเวศทางทะเลและชายฝั่ง จึงมีการพัฒนาการเลี้ยงแบบผสมผสานในระบบปิด (closed polyculture system) ด้วยวิธีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ตลอดการเลี้ยง เพื่อลดปริมาณสารอาหารตกค้างและควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม การเลี้ยงกุ้งแบบผสมผสานเกษตรกรนิยมทำการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมร่วมกับปลานิล ปลาหมอเทศ และปลาทับทิม เป็นต้น เนื่องจากปลาที่ทำการเลี้ยงร่วมกันมีพฤติกรรมการกินแบบกินเศษซากอาหารที่ตกค้างภายในบ่อ พืชน้ำและสาหร่าย ซึ่งส่งผลให้คุณภาพน้ำอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเลี้ยง และลดความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดโรคจากคุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสมทำให้กุ้งเกิดความเครียดนำไปสู่ความอ่อนแอและนำไปสู่การก่อให้เกิดโรค เช่น โรคตายด่วน (early mortality syndrome) ที่กำลังส่งผลกระทบต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมอย่างแพร่หลายในพื้นที่ภาคตะวันออก ทำให้เกษตรกรได้รับผลกระทบต่อรายได้ภาคครัวเรือนและแพร่กระจายไปยังภาคการส่งออกของประเทศ

ในพื้นที่ศึกษาจังหวัดจันทบุรีซึ่งเป็นหนึ่งในจังหวัดของประเทศไทยที่มีการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลอย่างแพร่หลาย โดยจำนวนพื้นที่ในการเพาะเลี้ยงเมื่อปีพ.ศ. 2554 พบว่ามีจำนวนพื้นที่การเพาะเลี้ยงทั้งสิ้น 42,344 ไร่ ปริมาณผลผลิตโดยรวมของกุ้งขาวแวนนาไมมีจำนวน 66,336 ตัน คิดเป็นมูลค่าผลผลิตประมาณ 8,307 ล้านบาท โดยเกษตรกรส่วนใหญ่ทำการเลี้ยงในรูปแบบพัฒนาที่มีความหนาแน่นสูง นอกจากนี้ยังพบว่าเกษตรกรส่วนใหญ่ยังไม่ได้รับการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงให้เหมาะสมตามมาตรฐาน Code of Conduct (CoC) ที่กำหนดโดยกรมประมง การเพาะเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมของเกษตรกรจะอาศัยการใช้น้ำทะเลโดยการสูบน้ำผ่านคลองชลประทานไปสู่พื้นที่การเพาะเลี้ยง เมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงก็ทำการปล่อยน้ำทิ้งออกสู่คลองชลประทานโดยไม่มีขั้นตอนการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยคืนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ การศึกษานี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำระหว่างการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานในระบบปิดกับการเลี้ยงแบบพัฒนาที่เป็นเลี้ยงแบบดั้งเดิม เพื่อเป็นแนวทางในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

ทำการเลี้ยงกุ้งแบบผสมผสานในระบบปิดร่วมกับปลานิลและการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนา โดยมีบ่อเลี้ยงขนาด 4 ไร่ อย่างละ 3 บ่อต่อรูปแบบการเลี้ยง รวมจำนวนบ่อเลี้ยงมีทั้งสิ้น 6 บ่อ และได้ทำการปล่อยกุ้งเป็นจำนวน 100,000 ตัวต่อไร่ในทั้งสองรูปแบบการเลี้ยงแต่ในระบบปิดที่มีการปล่อยปลานิลร่วมกับกุ้งจะทำการปล่อยปลานิลเป็นจำนวน 400 ตัวต่อไร่ ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้ง และภายหลังการเลี้ยง

ก่อนที่จะทำการปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ บริเวณบ่อเลี้ยงกุ้งในตำบลบางกะไชย อำเภอแหลมสิงห์ จังหวัดจันทบุรี โดยมีระยะเวลาการศึกษาในหนึ่งรอบการเลี้ยงตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 ถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2558

การตรวจวัดคุณภาพน้ำระหว่างการเลี้ยงกุ้งและภายหลังการเลี้ยงกุ้งในทุกพารามิเตอร์ ทำการตรวจวัดวิเคราะห์ตัวอย่างคุณภาพน้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ ในบริเวณทางน้ำเข้า กลางบ่อ และทางน้ำออก ในเวลา 08:00 น. โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างคุณภาพน้ำเบื้องต้นทุกวัน ได้แก่ อุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) ความเป็นกรด-ด่างด้วยด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ออกซิเจนละลายด้วยเครื่องวัดค่าออกซิเจนละลาย (DO meter) นอกจากนี้ในทุก 2 สัปดาห์ รวมถึงภายหลังการเลี้ยงซึ่งจะทำการตรวจวัดเพียงครั้งเดียวเมื่อเสร็จสิ้นการเลี้ยง จะเก็บตัวอย่างน้ำเข้าตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในห้องปฏิบัติการ โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดได้แก่ อุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์(thermometer) ความเค็มด้วยเครื่องวัดความเค็ม (refractometer) ความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ปริมาณออกซิเจนละลายด้วยเครื่องวัดค่าออกซิเจนละลาย (DO meter) ปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายอินทรีย์สารที่มีอยู่ในน้ำ (บีโอดี) ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Direct Method แอมโมเนียวิเคราะห์ด้วยวิธี Nesslerization ไนไตรท์ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Colorimetric Method ไนเตรททำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Brucine Method และ ฟอสเฟต ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Ascorbic acid Method และนำข้อมูลคุณภาพน้ำในการเลี้ยงแบบผสมผสานในระบบปิดและการเลี้ยงแบบพัฒนามาเปรียบเทียบผลทางสถิติโดยใช้ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาคุณภาพน้ำของการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม

จากการศึกษาคุณสมบัติของน้ำในบ่อทดลองที่ทำการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบพัฒนาและการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบผสมผสานในระบบปิด ตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา พบว่า อุณหภูมิของน้ำของการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าอยู่ระหว่าง 24.00-26.30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิภายหลังจากการเพาะเลี้ยงมีค่าอยู่ที่ 26 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 25.19±0.56 องศาเซลเซียส ในขณะที่การเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าอยู่ระหว่าง 24.40-26.20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิภายหลังจากการเพาะเลี้ยงมีค่าอยู่ที่ 26.10 องศาเซลเซียส และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 25.27±0.47 องศาเซลเซียส (Table 1) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากสภาพแวดล้อมของทั้ง 2 บริเวณมีลักษณะคล้ายคลึงกันโดยเป็นพื้นที่โล่งแจ้ง ซึ่งตลอดการเพาะเลี้ยงอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งที่อยู่ระหว่าง 25.00-33.00 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของน้ำเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงที่ปล่อยทิ้งของทั้ง 2 รูปแบบการเพาะเลี้ยงมีค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลประเภทที่ 3 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2549) ซึ่งถ้าอุณหภูมิของน้ำสูงเกินไปกุ้งจะมีการงอตัวเนื่องจากการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อและเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 18.00 องศาเซลเซียส กุ้งจะไม่ว่ายน้ำและหยุดการกินอาหาร นอกจากนี้ จากรายงานของสไบทิพย์ และคณะ (2543) กล่าวว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้แอมโมเนีย

อิสระ (un-ionized ammonia: NH_3) อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษสูง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละฤดูกาลนั้นมีผลต่อความแตกต่างของกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีการใช้ประโยชน์จากไนเตรท (Ogilvie *et al*., 1997)

ความเค็มของการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าอยู่ระหว่าง 33.00-36.00 ส่วนในพันส่วน โดยมีค่าความเค็มภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 35 ส่วนในพันส่วน และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 34.91±0.79 ส่วนในพันส่วน ในส่วนของการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าความเค็มอยู่ระหว่าง 33.00-36.00 ส่วนในพันส่วน โดยมีค่าความเค็มภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 34 ส่วนในพันส่วน และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 34.44±1.03 ส่วนในพันส่วน (Table 1) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความเค็มระหว่างบ่อที่ทำการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนาและบ่อที่ทำการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสาน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยระดับความเค็มที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวสามารถทำการเลี้ยงในช่วงความเค็มที่ 2-35 ส่วนในพันส่วน แต่ระดับความเค็มที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาวที่ดีที่สุดคือระดับความเค็มที่ 20-25 ส่วนในพันส่วน และระดับความเค็มเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงของทั้ง 2 รูปแบบการเพาะเลี้ยงมีค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลประเภทที่ 3 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ นอกจากนี้ความเค็มจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งแล้วยังมีผลทำลายอาหารตามธรรมชาติของกุ้งเองอีกด้วย เนื่องจากถ้ามีความเค็มสูงจะไปทำลายสิ่งมีชีวิตในกลุ่มแพลงก์ตอนพืชและสัตว์ที่มีความทนต่อความเค็มต่ำ ส่วนในน้ำที่มีความเค็มต่ำจะทำให้การเจริญเติบโตของแบคทีเรียและโพรโทซัวเพิ่มขึ้นจึงอาจทำให้กุ้งเกิดโรคได้ (วิภูษิต และคณะ, 2534)

การตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างในการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าอยู่ระหว่าง 7.19-8.49 โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 7.48 และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 7.91±0.33 ในขณะที่การเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 7.21-8.33 โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 7.36 และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 7.91±0.26 (Table 1) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) อันเนื่องมาจากตลอดการเพาะเลี้ยงของทั้งสองรูปแบบการเพาะเลี้ยงได้มีการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างตลอดการเพาะเลี้ยงโดยมีการปรับปรุงค่าความเป็นกรด-ด่างโดยการเติมปูนขาว ทั้งนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอยู่ระหว่าง 6.50-9.00 (ไมตรี และ จารุวรรณ, 2528) และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำในรอบวันไม่ควรแตกต่างกันมากกว่า 0.50 เพราะการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำในรอบวันที่มากเกินไปจะทำให้กุ้งเกิดความเครียดและส่งผลต่อการเจริญเติบโต การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในบ่อเพาะเลี้ยงขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น คุณสมบัติของดิน ค่าความเป็นด่าง การผลิตและการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำซึ่งส่วนใหญ่จะขึ้นกับปริมาณแพลงก์ตอนพืช เป็นต้น (ชลอ, 2543; พรเลิศ, 2547) และค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงทั้ง 2 รูปแบบการเพาะเลี้ยงมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลประเภทที่ 3 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และอยู่ในมาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของทั้ง 2 รูปแบบการเพาะเลี้ยงมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอันเนื่องมาจากการผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในช่วงท้ายของการเลี้ยง

เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายในการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนาอยู่ระหว่าง 5.12-8.89 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าปริมาณออกซิเจนละลายภายหลังการเลี้ยงอยู่ที่ 5.42 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ย

ตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 7.41±1.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ระหว่าง 7.01-8.63 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าปริมาณออกซิเจนละลายภายหลังการเลี้ยงอยู่ที่ 7.16 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 7.88±0.44 มิลลิกรัมต่อลิตร (Table 1) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยที่ปริมาณออกซิเจนละลายเฉลี่ยของทั้ง 2 รูปแบบการเพาะเลี้ยงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาวแวนนาไมอันเนื่องการให้อากาศอย่างต่อเนื่องทั้งในเวลากลางวันและกลางคืนเพื่อให้เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยง แต่อย่างไรก็ตามค่าปริมาณออกซิเจนละลายระหว่าง 5.00 ถึง 11.90 เป็นช่วงที่มีปริมาณแพลงก์ตอนพืชสูง (บรรจง, 2542) และเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงปริมาณออกซิเจนจากการเพาะเลี้ยงทั้ง 2 รูปแบบมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเลประเภทที่ 3 คุณภาพน้ำทะเลเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และปริมาณออกซิเจนเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงในการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายซากแพลงก์ตอนและของเสียที่ตกค้างในปริมาณที่สูงภายในบ่อเพาะเลี้ยงแบบพัฒนา ส่งผลทำให้ออกซิเจนในน้ำถูกนำไปใช้มาก สำหรับออกซิเจนจะมีผลต่อการเจริญเติบโต การกินอาหารและสุขภาพของกุ้ง ถ้าปริมาณออกซิเจนละลายไม่เหมาะสม อาจทำให้กุ้งแสดงอาการเพียงเล็กน้อยจนถึงขั้นรุนแรงจนอาจทำให้กุ้งตายได้ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่าง คือ มีค่าต่ำสุดในตอนเช้ามืด เนื่องจากในช่วงกลางคืนจุลินทรีย์และแพลงก์ตอนพืชจะใช้ออกซิเจนเพื่อการหายใจ รวมทั้งจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายของเสียและสารอินทรีย์ในบ่อเพาะเลี้ยง หลังจากนั้นแพลงก์ตอนพืชจะเริ่มมีการสังเคราะห์แสงตั้งแต่ช่วงที่มีแสงสว่างทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้นและสูงสุดในช่วงบ่าย

Table 1 Mean±Standard deviation (SD) of water quality in the two culture systems of *L. vannamei* .

Water parameters	Treatment	
	Control	Closed polyculture
Temperature (℃)	25.19±0.56[a]	25.27±0.47[a]
Salinity (ppt)	34.91±0.79[a]	34.44±1.03[a]
pH	7.91±0.33[a]	7.91±0.26[a]
Dissolved oxygen (mg/L)	7.41±1.12[a]	7.01-8.63[a]

Remark: The data with suffixes that difference was statistically significant, the confidence level of 95%.

เมื่อทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณบีโอดีในน้ำของการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าอยู่ระหว่าง 4.00-25.90 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าปริมาณบีโอดีภายหลังการเลี้ยงอยู่ที่ 26.14 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 13.68±7.39 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ปริมาณบีโอดีในน้ำของการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าอยู่ระหว่าง 4.00-8.60 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าปริมาณบีโอดีภายหลังการเลี้ยงอยู่ที่ 8.11 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 6.01±1.32 มิลลิกรัมต่อลิตร (Figure 1A) เมื่อเปรียบค่าปริมาณบีโอดีเฉลี่ยของทั้ง 2 รูปแบบการเพาะเลี้ยง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่ค่าปริมาณบีโอดีในการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานอันเนื่องจากน้ำในการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามี

การปนเปื้อนของอินทรีย์สารสูง โดยส่วนมากปริมาณสารอินทรีย์จะมาจากอาหารส่วนที่เหลือ สิ่งขับถ่าย และซากแพลงก์ตอนที่ตายสะสมอยู่ในพื้นเลนสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานที่มีปลานิลเป็นส่วนร่วมในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนและจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำและเลนส่งผลทำให้ปริมาณบีโอดีภายในบ่อเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนาและเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยง ปริมาณบีโอดีของการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีปริมาณบีโอดีสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสาน อีกทั้งปริมาณบีโอดีในบ่อควบคุมมีค่าเกินค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งที่กำหนดไว้ปริมาณบีโอดีต้องไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียรวมของการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าอยู่ระหว่าง 0.02-2.52 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าปริมาณแอมโมเนียภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 2.49 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 1.05±0.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าปริมาณแอมโมเนียรวมอยู่ระหว่าง 0.11-0.78 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าปริมาณแอมโมเนียภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 0.83 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 0.44±0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร (Figure 1B) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณแอมโมเนียรวมของบ่อควบคุมและบ่อทดลอง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ทั้งนี้การเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีการสะสมตัวของปริมาณแอมโมเนียรวมจากขับถ่ายของเสียและการเน่าสลายของเศษอาหารจึงส่งทำให้มีปริมาณแอมโมเนียรวมสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อลดการสะสมตัวของของเสีย และจากกราฟในช่วงแรกปริมาณแอมโมเนียรวมของการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนาอันเนื่องมาจากขั้นตอนเตรียมบ่อเพาะเลี้ยงได้ทำการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการเพาะเลี้ยงภายในมาทำการบำบัดและปรับปรุงคุณภาพน้ำให้สามารถทำการเพาะเลี้ยงในรอบต่อๆไปได้ จึงทำให้มีการตกค้างของปริมาณแอมโมเนียรวม และทั้งนี้แอมโมเนียรวมจะเข้าไปทำลายเหงือกและความสามารถในการขนส่งออกซิเจนในตัวกุ้ง ผลที่ตามมาคือทำให้กุ้งอ่อนแอและติดโรคได้ง่าย ระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมที่ทำให้สัตว์น้ำตายโดยปกติอยู่ในช่วง 0.40-2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร (ชลอ, 2543) และจากการศึกษาของ Kungvankij *et al*. (1986) พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียรวม 0.45 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้การเจริญเติบโตของกุ้งลดลงถึงร้อยละ 50.00 ดังนั้น ความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมในบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาวแวนนาไมควรมีค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมอยู่ที่ 1.00-1.20 มิลลิกรัมต่อลิตร (นิคม และคณะ, ม.ป.ป.)

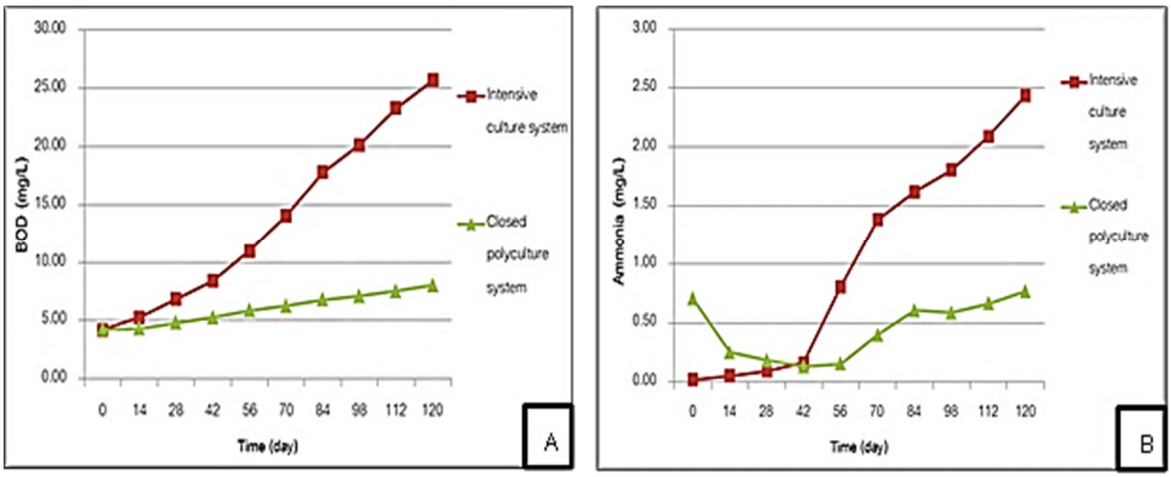


Figure 1 Water quality in the culture systems of *L. vannamei*, (A) BOD, (B) Ammonia.

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนไตรท์ในการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าอยู่ระหว่าง 0.00-0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าปริมาณไนไตรท์ภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 0.06±0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนของการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าปริมาณไนไตรท์อยู่ระหว่าง 0.01-0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าปริมาณไนไตรท์ภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 0.02±0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร (Figure 2A) เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณไนไตรท์ทั้งสองรูปแบบการเพาะเลี้ยง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แนวโน้มของปริมาณไนไตรท์ในการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานช่วง 42 วันแรกมีค่าปริมาณไนไตรท์สูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนาอันเนื่องมาจากภายในระบบการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีการหมุนเวียนน้ำที่ผ่านการเพาะเลี้ยงภายในมาทำการบำบัดและปรับปรุงคุณภาพน้ำให้สามารถทำการเพาะเลี้ยงในรอบต่อๆ ไปได้ จึงทำให้มีการตกค้างของปริมาณไนไตรท์และทำให้ในช่วงแรกมีค่าสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนา อีกทั้งในบ่อพักน้ำก่อนทำการสูบเข้ามายังบ่อเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานได้มีการเติมอากาศต่ำกว่าบ่อเพาะเลี้ยงแบบพัฒนาและมีการปล่อยปลานิลเพื่อรักษาระบบความสมดุล จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียที่เกิดจากการขับถ่ายของเสียจากปลานิลเป็นไนไตรท์ได้อย่างสมบูรณ์และเมื่อเวลาผ่านไปการควบคุมคุณภาพน้ำภายในระบบได้ผ่านการปรับปรุงและควบคุมไม่ให้ปริมาณไนไตรท์มีค่าสูงซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง และเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงทั้ง 2 รูปแบบมีปริมาณไนไตรท์อยู่ในค่ามาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง แต่อย่างไรก็ตามปริมาณไนไตรท์เมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานอันเนื่องมาจากการสะสมตัวของของเสียที่เกิดจากการเพาะเลี้ยง

ปริมาณไนเตรทในการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าปริมาณไนเตรทภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 0.07±0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าปริมาณไนเตรทอยู่ระหว่าง 0.01-0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนเตรทภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 0.03±0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (Figure 2B) เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณไนเตรทของทั้งสองรูปแบบการเพาะเลี้ยง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่ในช่วงต้นของการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนเตรทที่เกิดจากการเติมสารปรับแต่งเพื่อเพิ่มปริมาณธาตุอาหารภายในบ่อและเป็นการเร่งการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชภายในบ่อ และเมื่อทำการเติมออกซิเจนในน้ำเพิ่มมากขึ้นสามารถลดปริมาณแอมโมเนียที่จะมีการเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรท แต่ในขณะเดียวกันปริมาณไนเตรทในการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าลดลงในช่วงต้นของการเพาะเลี้ยงอันเนื่องมาจากการเติมอากาศและการเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อรักษาระดับของปริมาณแอมโมเนียที่เกิดจากการขับถ่ายของเสียของปลานิล จึงทำให้มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อปริมาณแอมโมเนียและของเสียตกค้างภายในบ่อมีเพิ่มมากขึ้นแต่อย่างไรก็ตามการจัดการคุณภาพน้ำภายในระบบการเพาะเลี้ยงนี้ได้ทำการรักษาระดับแอมโมเนียในเหมาะสมโดยการเปลี่ยนถ่ายน้ำและนำไปผ่านการบำบัดการนำกลับมาเติมเข้าสู่บ่อเพาะเลี้ยง และเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงพบกว่าการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีปริมาณไนเตรทสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานอันเนื่องมาจากการสะสมตัวของของเสียที่เกิดจากการเพาะเลี้ยง อย่างไรก็ตามทั้ง 2 รูปแบบการเพาะเลี้ยงมีค่าปริมาณไนเตรทอยู่ในค่ามาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

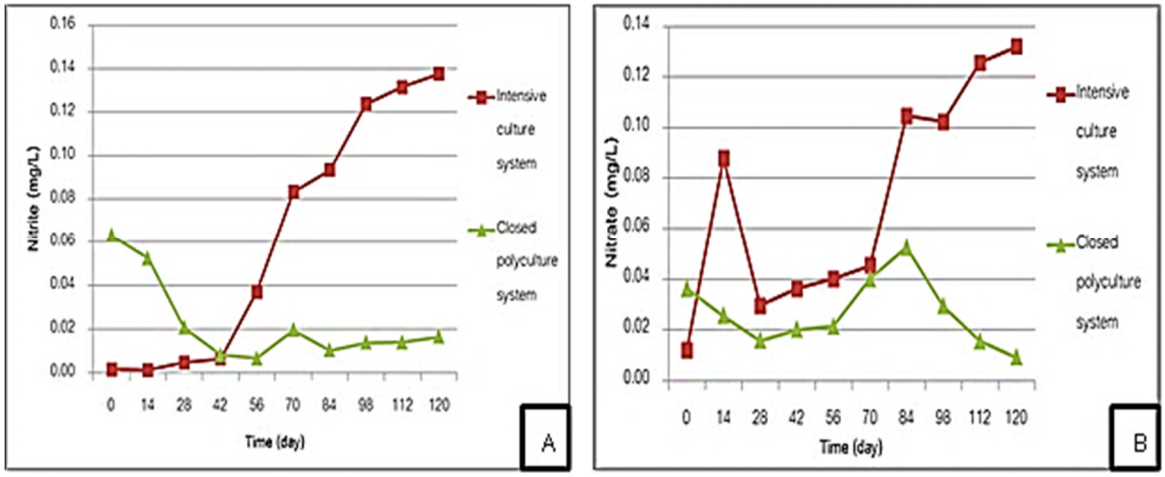


Figure 2 Water quality in the two culture systems of *L. vannamei*, (A) Nitrite, (B) Nitrate.

ปริมาณฟอสเฟตของการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าอยู่ระหว่าง 0.02-0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณฟอสเฟตภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 0.05±0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และในขณะที่ปริมาณฟอสเฟตของการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01-0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณฟอสเฟตภายหลังจากการเลี้ยงอยู่ที่ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าเฉลี่ยตลอดการเลี้ยงอยู่ที่ 0.02±0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (Figure 3) เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณฟอสเฟตทั้งสองรูปแบบการเพาะเลี้ยง พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และการที่การเพาะเลี้ยงแบบพัฒนาพบค่าปริมาณฟอสเฟตสูงในช่วงต้นของการเพาะเลี้ยงนั้นเนื่องมาจากขั้นตอนการเตรียมน้ำเพื่อทำการเพาะเลี้ยงได้มีการเติมปุ๋ยเพื่อให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืชและมีค่าลดลงเมื่อแพลงก์ตอนพืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของฟอสเฟตในช่วงท้ายของการเพาะเลี้ยงเกิดจากฟอสเฟตที่มีอยู่ในอาหารกุ้งในบางส่วนที่หลงเหลือจากการกินอาหารไม่ทันจะละลายน้ำและบางส่วนจะถูกพืชนำไปใช้ และสุดท้ายจะตกตะกอนลงไปสะสมยังพื้นเลน และเมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงปริมาณฟอสเฟตของการเพาะเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าปริมาณฟอสเฟตสูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานและมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งซึ่งได้กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร

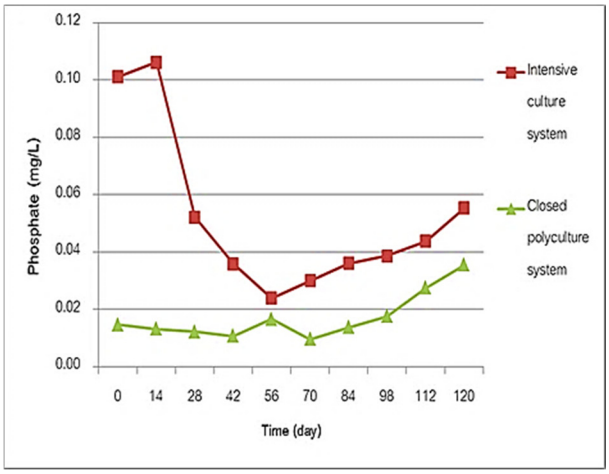


Figure 3 Concentration of phosphate in the two culture systems of *L. vannamei*.

สรุป

คุณสมบัติของน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมของทั้ง 2 รูปแบบการเลี้ยง พบว่าคุณภาพน้ำอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ยกเว้นปริมาณบีโอดี แอมโมเนียและไนไตรท์ในการเลี้ยงแบบพัฒนามีค่าที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากการเกิดการสะสมของเสียตกค้างภายในบ่อ ในขณะที่การเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานร่วมกับปลานิลมีค่าปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์ และบีโอดีที่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมอันเนื่องมาจากปลานิลมีพฤติกรรมการกินแพลงก์ตอนพืชและเศษซากของเสียที่ตกค้างภายในบ่ออีกทั้งยังมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำไปยังบ่อพักน้ำเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยไม่มีการดึงน้ำจากแหล่งน้ำเข้ามาเติมและไม่มีการถ่ายน้ำออกไปยังแหล่งน้ำทางธรรมชาติเพื่อเป็นรักษาคุณภาพน้ำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง ดังนั้นการเพาะเลี้ยงแบบผสมผสานในระบบปิดจึงเป็นแนวทางเลือกที่ดีเพื่อนำไปสู่การปรับเปลี่ยนรูปแบบการเพาะเลี้ยงและเป็นแนวทางในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนพัฒนาศักยภาพนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน และขอขอบพระคุณภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการปฏิบัติการคุณภาพน้ำและคำแนะนำในการเก็บตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2549. **มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล**. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th, 12 ตุลาคม 2558.

กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2532. **โครงการศึกษาและวิจัยคุณภาพน้ำในแม่น้ำสายหลัก**. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ. 2543. **กุ้งไทย 2000 สู่ความยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม**. เจริญรัฐการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชชกูล. 2547. **อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย**.สนับสนุนการจัดการพิมพ์โดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เพื่อเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช เนื่องในวโรกาสพระราชพิธีมหามงคลเฉลิมพระชนมพรรษา 5 ธันวาคม พ.ศ. 2547. บริษัท เมจิคพับบลิเคชั่น จำกัด.

นิคม ละอองศิริวงศ์, คมน์ ศิลปาจารย์ และ ลักขณา ละอองศิริวงศ์. ม.ป.ป. **แอมโมเนียกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ**. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กองวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง กรมประมง, กรุงเทพฯ.

บรรจง เทียนส่งรัศมี. 2542. **เทคโนโลยีการเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำหลังทศวรรษที่ 20**. ม.ป.ท.

ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และ จารุวรรณ สมศิริ. 2528. **คุณสมบัติน้ำและการวิเคราะห์สำหรับการวิจัยประมง**. โรงพิมพ์ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

วิภูษิต มัณฑะจิตร, วรวิทย์ ชีวาพร และ สมถวิล จริตควร. 2534. **ปัจจัยทางนิเวศวิทยาที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon* Fabricius) (ปัจจัยทางกายภาพ)**. ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบรูพา, ชลบุรี.

ธีรยุทธ น่วมทอง. 2551. **ผลของน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งขาว (*Penaeus vannamei*) แบบพัฒนาต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สไบทิพย์ อมรจารุชิต, พัชริดา เหมมัน, สิริ ทุกข์วินาศ และ รังสิไชย ทับแก้ว. 2543. **การศึกษาความผันแปรของคุณภาพน้ำและดินในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ในเขตพื้นที่น้ำจืด จังหวัดราชบุรี**. กรุงเทพฯ: กรมประมง.

Brock, J.A. and K. Main. 1994. **Ecology of Sandy Shore**. Elsevier Sciences Publishes B.V., Amsterdam.

Ogilvie, B., D.B. Nedwell and R.M. Harrison. 1997. **Oceanographic Literature Review**. Elsevier Sciences Publishes B.V., United Kingdom.

Kungvankij, P., P. T.E. Chua, J. Pudadera, G. Corres, L.B. Tibo, Io. Potestas, G.A. Taleona and J.N. Paw. 1986. **Shrimp culture: pond design operation and management**. *In* Asia (NACA), Region Lead Center in Philippines (RLCP). Aquaculture Department, Southeast Asian Fisheries Development Center, Network of Aquaculture Center. Iloilo, Philippines.

O'Neill, P. 1993. **Environmental chemistry**. 2nd ed. Suffolk: Edmundsbury.

การขยายพันธุ์และการเจริญเติบโตของผักบุ้งทะเลที่ปลูกคลุมดินบริเวณชายหาดชลาทัศน์

Propagation and growth of *Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br* for cover plants at Chalathat Beach.

ณิชา ประสงค์จันทร์* มุกดา สุขสวัสดิ์ และ สมบูรณ์ ประสงค์จันทร์

Nicha Prasongchan, Mookda Suksawat and Somboon Prasongchan

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้งทะเล ตลอดระยะเวลา 3 เดือน โดยศึกษาตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556 - เดือนเมษายน พ.ศ. 2556 ดำเนินการทดลองและบันทึกผลการทดลองจากแปลงปลูกบริเวณชายหาดชลาทัศน์ จังหวัดสงขลา มีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) แบ่งเป็น 9 หน่วยการทดลอง หน่วยการทดลองละ 4 ซ้ำๆละ 3 ต้น โดยศึกษาต้นพันธุ์ 3 ประเภท คือ ต้นพันธุ์จากกอ ต้นพันธุ์จากการแยกกอ ต้นพันธุ์จากการปักชำ บริเวณแปลงปลูก 3 บริเวณ คือ แปลงปลูกริมถนน แปลงปลูกใต้ต้นสนและแปลงปลูกริมทะเล ผลการทดลอง พบว่า ต้นพันธุ์จากกอบริเวณแปลงปลูกริมทะเลมีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุด โดยมีความสูงของลำต้นเฉลี่ยสูงสุด 57.21 เซนติเมตร จำนวนใบเฉลี่ยสูงสุด 37 ใบ และมีเปอร์เซ็นต์การแผ่ขยายดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยการทดลองอื่นๆ

ABSTRACT

The objective of this research was to compare the growth of *Ipomoea pes-caprae (L.)R.Br*. This experiment was carried out 3 months from February 2013 to April 2013 at Charathat Beach, Songkhla Province. A completely Randomized Design was used with 9 treatments 4 replications and 3 plants . Treatment were plant from clump, plant from cultivated clump and plant from stem cutting at 3 areas : roadsite plots, under pine tree plots and seasite plots. This study was to determine the growth of *Ipomoea pes- caprae(L.)R.Br*. The results showed that plant from clump in seasite plots had the highest growth when compared with other treatments in term of stem height (57.21 centimeters) , number of leaves (37 leaves)and percent of stem slither.

Key Words: Propagation, *Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br*, growth, Chalathat Beach.

* Corresponding author; e-mail address: ingoakaom@gmail.com

หลักสูตรวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา 90000

Curriculum of Science, Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla 90000

คำนำ

ปัจจุบันชายฝั่งทะเลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ การกัดเซาะชายฝั่ง ทำให้เสียพื้นที่ริมฝั่งหรือชายหาด โครงสร้างระบบนิเวศที่เป็นประโยชน์ เช่น แนวต้นโกงกางป่าชายเลน ช่วยลดพลังงานคลื่นและรักษาสภาพชายฝั่งทะเล นอกจากนี้ป่าชายหาด (Beach Forest) ซึ่งปกคลุมบริเวณชายฝั่งทะเลที่เป็นดินทรายเป็นสังคมพืชชนิดหนึ่งของป่าฝนเขตร้อน (Tropical Rain Forest) โดยเฉพาะในจังหวัดสงขลา สนทะเลมักเป็นไม้เด่นแต่เพียงอย่างเดียว ไม่มีไม้อื่นเข้ามาผสมส่วนไม้พื้นล่างก็มีอยู่น้อยชนิดที่พบ ได้แก่ ดินสอทะเล, หนาดผา, หญ้าลอยลม, ถั่วคร้า และผักบุ้งทะเล (สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 6, 2555) ปัจจุบันชายหาดชลาทัศน์ ในเขตเทศบาลเมือง จ.สงขลา ซึ่งกำลังถูกกัดเซาะจนทำให้เสียพื้นที่บริเวณชายหาดไปอย่างต่อเนื่อง พืชเด่นชนิดหนึ่งบริเวณชายหาดชลาทัศน์ คือ ต้นผักบุ้งทะเล (*Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br*) พบได้ทั่วไปในธรรมชาติและสามารถปลูกเพื่อคลุมดิน อีกทั้งมีประโยชน์ทางด้านการแพทย์ โดยจากตำราแพทย์แผนไทยมีการใช้ประโยชน์ตามวิถีของชาวบ้าน ใบผักบุ้งทะเลมีประสิทธิภาพในการรักษาพิษจากแมงกะพรุนเป็นอย่างดี ช่วยสมานแผล โดยนำใบผักบุ้งทะเลขยี้กับน้ำส้มสายชูแล้วมาประคบผิวหนังบริเวณที่โดนพิษไว้และห่อด้วยผ้าขาวบาง ทิ้งไว้ประมาณ 30-60 นาที รอให้อาการปวดแสบปวดร้อนคลายลง จากประโยชน์ของผักบุ้งทะเลดังกล่าว จึงควรมีการศึกษาวิธีการขยายพันธุ์ต้นผักบุ้งทะเลจากต้นพันธุ์ประเภทต่างๆ เพื่อเพาะพันธุ์เป็นต้นกล้าและปลูกลงดินในแปลงปลูกตามธรรมชาติซึ่งมีพื้นที่แตกต่างกัน พร้อมศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของต้นกล้าประเภทต่างๆหลังปลูกลงแปลงปลูก นำผลการทดลองที่ได้มาสรุป เพื่อให้ทราบประเภทของต้นกล้าที่สามารถขยายพันธุ์ได้ดีและพื้นที่ปลูกที่ดีที่สุดซึ่งทำให้ต้นผักบุ้งทะเลเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบวิธีการขยายพันธุ์ที่ดีที่สุดแล้ว จึงเพาะพันธุ์ต้นกล้าผักบุ้งทะเล และนำต้นกล้าที่ได้ปลูกลงดินเพื่อซ่อมแซมหน้าดินที่ถูกกัดเซาะ ตลอดจนการขยายพันธุ์ให้มากขึ้นเพื่อปลูกคลุมดินและรักษาหน้าดินบริเวณชายหาดให้คงอยู่ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้มีกรอบแนวคิดในกระบวนการทดลอง เพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของต้นกล้าผักบุ้งทะเลประเภทต่างๆหลังปลูกลงแปลงปลูก Figure 1 มีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยการคัดเลือกต้นพันธุ์ที่มีลักษณะต้นใกล้เคียงกัน ได้แก่ ขนาดและความยาวลำต้น จำนวนและขนาดใบ แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ ต้นพันธุ์จากกอ, ต้นพันธุ์จากการแยกกอ และต้นพันธุ์จากการปักชำ Figure 2 โดยนำต้นพันธุ์ปลูกลงในอุปกรณ์เพาะพร้อมดูแลรักษาจนต้นกล้าติดต้น Figure 3 แล้วจึงนำลงปลูกในแปลงปลูกบริเวณชายหาดชลาทัศน์ พร้อมบันทึกข้อมูล ได้แก่ ความสูงของต้น จำนวนใบ แบ่งการทดลองเป็น 9 หน่วยการทดลองๆละ 4 ซ้ำๆละ 3 ต้น ดังนี้ ต้นพันธุ์จากกอ ต้นพันธุ์จากการแยกกอ และต้นพันธุ์จากการปักชำโดยปลูกบริเวณแปลงริมถนน, ต้นพันธุ์จากกอ ต้นพันธุ์จากการแยกกอ และต้นพันธุ์จากการปักชำโดยปลูกบริเวณแปลงใต้ต้นสน, ต้นพันธุ์จากกอ ต้นพันธุ์จากการแยกกอ และต้นพันธุ์จากการปักชำโดยปลูกบริเวณแปลงริมทะเล ทำการเก็บข้อมูลอัตราการเจริญเติบโตทุก 2 สัปดาห์ตลอดระยะเวลา 3 เดือน บันทึกลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของดินบริเวณแปลงปลูก ลักษณะการได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ และศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้งทะเล ได้แก่ ความยาวของลำต้น จำนวนใบ เปอร์เซ็นต์การแผ่ขยายเลื้อยคลุมดินของต้นผักบุ้งทะเล พร้อมนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแตกต่าง (Analysis of variance) แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิธี Duncan 's Multiple Range Test

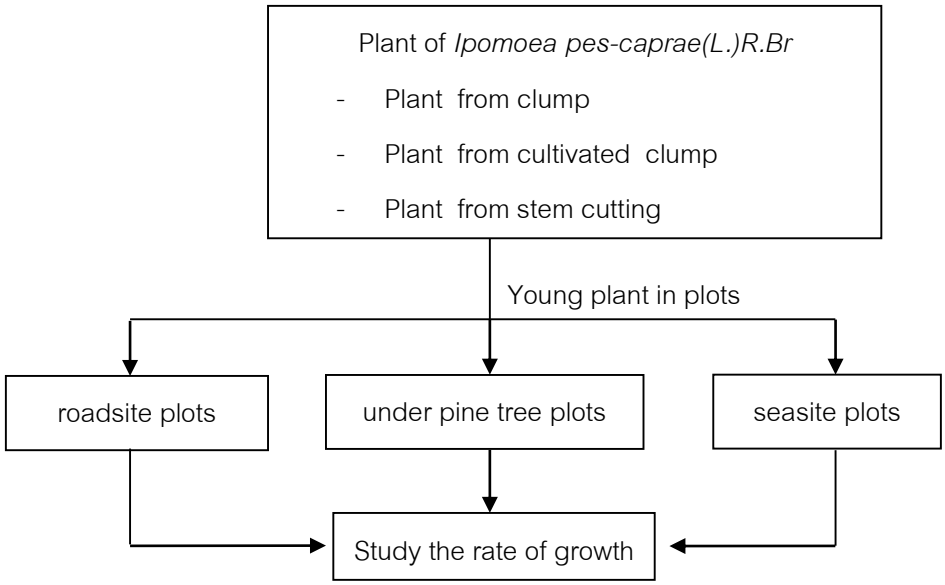


Figure 1 Research Framework.



Figure 2 Three types of plant for cultivation.

A: Plant from clump B: Plant from cultivated clump C: Plant from stem cutting

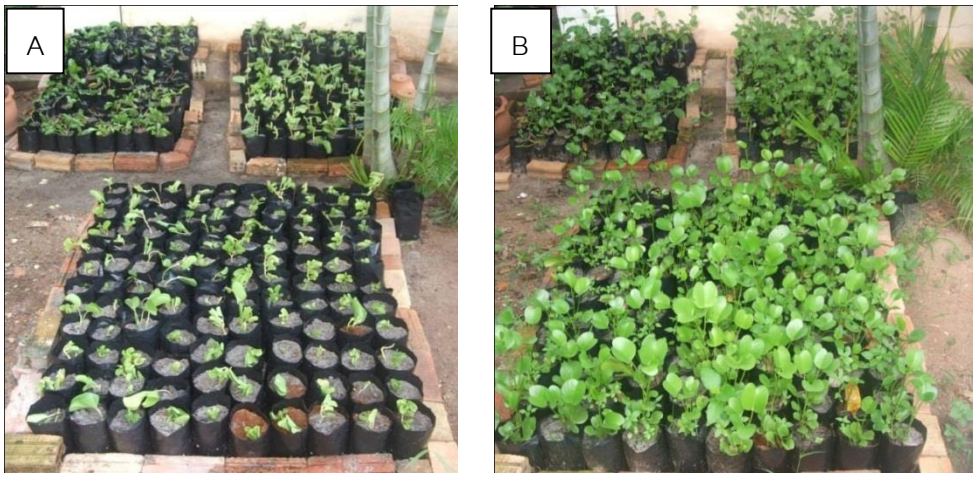


Figure 3 Characteristics of *Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br* growth in nursery bag.

A: Young plant start growth B: 2 weeks after planting

ผลและวิจารณ์

การเปรียบเทียบสมบัติของดินและปัจจัยสิ่งแวดล้อม

ลักษณะทางกายภาพของดิน

ดินแปลงปลูกบริเวณริมถนน เป็นดินทรายเนื้อหยาบ มีเศษอินทรียวัตถุปะปนอยู่ เนื่องจากเทศบาลนครสงขลาปลูกต้นหูกวางเป็นระยะตลอดแนวถนน ทำให้มีการทับถมและย่อยสลายของใบพืชที่ร่วงหล่น จากการวัดสีดิน โดยใช้ MUNSELL SOIL COLOR CHARTS มีค่า 5/2/2.5Y สำหรับแปลงปลูกบริเวณใต้ต้นสน เป็นดินทรายเนื้อหยาบ มีเศษอินทรียวัตถุปะปนอยู่เช่นเดียวกับแปลงปลูกบริเวณริมถนน เนื่องจากแปลงปลูกอยู่ใต้แนวต้นสน ทำให้มีการทับถมและย่อยสลายของใบสนที่ร่วงหล่น การวัดสีดิน พบว่ามีค่า 6/2/2.5Y แปลงปลูกบริเวณริมทะเล เป็นดินทรายเนื้อหยาบ ไม่มีเศษอินทรียวัตถุปะปน เนื่องจากแปลงปลูกอยู่ในที่โล่ง วัดสีดิน พบว่ามีค่า 7/2/2.5Y จะเห็นได้ว่าความเข้มของสีดินสัมพันธ์กับปริมาณอินทรียวัตุที่สะสมอยู่

คุณสมบัติทางเคมีของดิน

ดินแปลงปลูกบริเวณริมถนน มีค่า pH 7.74 ขณะที่แปลงปลูกบริเวณใต้ต้นสนและแปลงปลูกบริเวณริมทะเล มีค่า pH ใกล้เคียงกัน คือ 7.84 และ pH 7.84 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ค่า pH ของดิน แปรผันตามระดับความเค็มของดิน สอดคล้องกับการศึกษาของ (Matsi and Keramides, 1998) ซึ่งกล่าวว่า ค่า pH ของดินเพิ่มมากขึ้นเมื่อดินมีระดับความเค็มมากขึ้นและกล้าไม้ที่เป็นพืชชายหาดจะสามารถขึ้นในพื้นที่ใกล้ทะเลมากที่สุดและมีอัตราการรอดสูง (ไตรเทพ, 2556) Figure 4

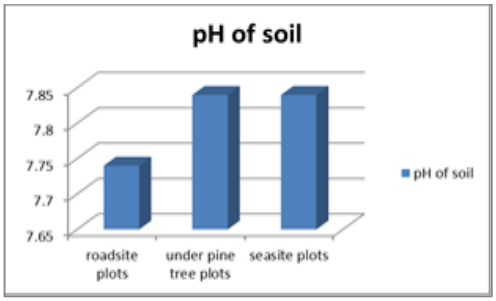


Figure 4 Comparison of soil pH at 3 plots.

การได้รับแสงจากดวงอาทิตย์บริเวณแปลงปลูก

กระบวนการดำเนินงานวิจัยอยู่ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์-เดือนเมษายน ซึ่งเป็นฤดูร้อนของจังหวัดสงขลา (ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทะเล, 2549) แปลงปลูกบริเวณริมถนนชลาทัศน์ มีแสงแดดส่องถึงโดยตรงในช่วงบ่าย วันละ 3-4 ชั่วโมง แต่ในช่วงเช้าไม่ได้รับแสงแดดเนื่องจากมีแนวต้นสนบดบังทิศทางการส่องสว่างของแสงแดดจากดวงอาทิตย์ แปลงปลูกบริเวณใต้ต้นสนได้รับแสงรำไรเนื่องจากอยู่ใต้แนวต้นสนและแปลงปลูกบริเวณริมทะเล อยู่ในที่โล่งได้รับแสงแดดตลอดเวลา

ลักษณะการเจริญเติบโตด้านความสูงของต้น

การเจริญเติบโตด้านความสูงของต้นผักบุ้งทะเล โดยการวัดจากพื้นโคนต้นจนถึงยอดสูงสุด ในระยะ 15 วันแรก พบว่า ความสูงของต้นผักบุ้งทะเลทั้ง 3 ประเภทในแปลงปลูกทั้ง 3 บริเวณ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยมีความสูงของต้นเฉลี่ยระหว่าง 23.49 - 28.23 เซนติเมตร ต่อมาในวันที่ 30 ความสูงของต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกริมทะเล (T7) มีความสูงมากที่สุด คือ 32.45 เซนติเมตรและต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกริมถนน

(T3) 31.84 เซนติเมตร ตามลำดับและไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ในวันที่ 45 ต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกใต้ต้นสน (T4) และต้นพันธุ์จากการแยกกอแปลงปลูกใต้ต้นสน (T5) เริ่มมีอัตราการเจริญเติบโตทางด้านความสูงลดลง เพราะแปลงปลูกอยู่ใต้แนวต้นสนทำให้ต้นผักบุ้งทะเลไม่ได้รับแสงแดด ทั้งนี้ เนื่องจากต้นผักบุ้งทะเลเป็นพรรณไม้กลางแจ้ง ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี มักขึ้นตามหาดทรายหรือริมทะเลที่มีแสงแดดจัด และสามารถขยายพันธุ์โดยวิธีการปักชำหรือการเพาะเมล็ด (วิทยา, 2554) ขณะที่ต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกริมถนน (T3) และต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกริมทะเล (T7) มีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงมากที่สุด ในวันที่ 60 ต้นพันธุ์จากการแยกกอแปลงปลูกใต้ต้นสนเริ่มมีการตายของต้น (T5) ในขณะที่ต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกริมถนน (T3) และต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกริมทะเล (T7) มีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงมากที่สุด ในวันที่ 90 ของการปลูก ต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกริมทะเล (T7) มีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงมากที่สุด คือ 57.21 เซนติเมตร ต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกริมถนน (T3) และต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกริมทะเล (T9) มีอัตราการเจริญเติบโตทางด้านความสูงรองลงมา คือ 46.66 เซนติเมตรและ 46.58 เซนติเมตร ตามลำดับ (Table 1)

Table 1 The height (cm) of *Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br* at plots for 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 days.

Treatments / day	0	15	30	45	60	75	90
T1 : Young plant from clump	25.66	27.13	28.97ab	31.14ab	33.30ab	35.11bcd	37.43c
T2: Young plant from cultivated clum	21.33	23.49	25.64b	28.34ab	30.70ab	32.99cd	35.24cd
T3: Young Plant from stem cutting	24.58	28.23	31.84a	35.88a	38.81a	42.71ab	46.66b
T4: Young plant from clump	23.47	24.63	25.50b	25.93c	26.51e	27.38e	28.04e
T5: Young plant from cultivated	23.80	24.59	25.44b	25.13c	0.00f	0.00f	0.00f
T6: Young Plant from stem cutting	22.81	23.65	24.41b	25.04b	25.78d	26.54d	27.43d
T7: Young plant from clump	22.76	27.46	32.45a	36.89a	42.43a	48.31a	57.21a
T8:Young plant from cultivated clump	22.60	25.56	27.66ab	31.04ab	34.72bc	37.48bc	40.96bc
T9: Young Plant from stem cutting	23.04	26.36	28.41ab	33.32ab	38.36b	42.46ab	46.58b

Notes : T1, T2, T3 : Young plant at roadsite plots

T4, T5, T6 : Young plant at under pine tree plots

T7, T8, T9 : Young plant at seasite plots

In the same column, the different letters following the represent significantly different ($p<0.05$) by DMRT

ลักษณะการเจริญเติบโตด้านจำนวนใบของต้น

จำนวนใบของต้นผักบุ้งทะเลหลังปลูกลงแปลงในระยะ 15 วันแรกมีการร่วงหล่น เนื่องจากต้นผักบุ้งทะเลอยู่ในระยะปรับตัวให้เข้ากับลักษณะดินและสภาพแวดล้อมต่างๆบริเวณแปลงปลูกตามสภาวะธรรมชาติ เมื่อผ่านไป 45 วัน ต้นผักบุ้งทะเลมีการผลิใบเพิ่มขึ้น ยกเว้นต้นที่ปลูกบริเวณใต้ต้นสน ได้แก่ ต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกใต้ต้นสน (T4) และต้นพันธุ์จากการแยกกอแปลงปลูกใต้ต้นสน (T5) มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนใบน้อยกว่าต้นพันธุ์จากหน่วยการทดลองอื่นๆ ซึ่งจำนวนใบค่อยๆเหี่ยวเฉาและหลุดร่วงจนกระทั่งมีการตายของต้น เมื่อวัดอัตราการเจริญเติบโตทางด้านจำนวนใบในวันที่ 60 พบว่า แปลงปลูกบริเวณริมถนน ได้แก่ ต้นพันธุ์จากกอ (T1) ต้นพันธุ์จากการแยกกอ (T2) ต้นพันธุ์จากการปักชำ (T3) นอกจากนี้ต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกใต้ต้นสน (T6) และต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกริมทะเล (T9) มีจำนวนใบเพิ่มใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างทางสถิติ ในขณะ

ที่ต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกริมทะเล (T7) มีการเพิ่มของจำนวนใบมากที่สุดและแตกต่างทางสถิติจากหน่วยการทดลองอื่นๆ เมื่อวัดอัตราการเจริญเติบโตทางด้านจำนวนใบในวันที่ 75 พบว่า ต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกริมทะเล (T7) มีอัตราการเจริญเติบโตทางด้านจำนวนใบมากที่สุดและแตกต่างทางสถิติจากหน่วยการทดลองอื่นๆ เมื่อวัดอัตราการเจริญเติบโตทางด้านจำนวนใบในวันที่ 90 พบว่า ต้นพันธุ์จากการแยกกอแปลงปลูกริมถนน (T2) ต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกริมถนน (T3) ต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกใต้ต้นสน (T6) มีการเพิ่มของจำนวนใบเท่ากันและไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่น้อยกว่าใบของต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกริมถนน (T1) และต้นพันธุ์จากการแยกกอแปลงปลูกริมทะเล (T8) สำหรับต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกริมทะเล (T7) มีการเพิ่มของจำนวนใบมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยการทดลองอื่นๆ (Table 2)

Table 2 Number of leaves of *Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br* at plots for 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 days.

Treatments / day	0	15	30	45	60	75	90
T1 : Young plant from clump	7abc	8ab	10ab	12a	13b	15b	16bc
T2: Young plant from cultivated clum	8ab	7ab	9abc	10a	11b	12b	14c
T3: Young Plant from stem cutting	6bc	8ab	9ab	11a	12b	13b	14c
T4: Young plant from clump	6bc	6b	6c	8b	10c	5c	7d
T5: Young plant from cultivated	8ab	9ab	8bc	12b	0d	0d	0e
T6: Young Plant from stem cutting	6c	7ab	8bc	10a	11b	12b	14c
T7: Young plant from clump	5c	7ab	10ab	14a	18a	25a	37a
T8:Young plant from cultivated clump	9a	9a	12a	12a	15ab	17b	20bc
T9: Young Plant from stem cutting	6c	7ab	9abc	11a	13b	17b	21b

Notes: T1, T2, T3 : Young plant at roadsite plots

T4, T5, T6 : Young plant at under pine tree plots

T7, T8, T9 : Young plant at seasite plots

In the same column, the different letters following the represent significantly different ($p<0.01$) by DMRT

การแผ่ขยายของต้นผักบุ้งทะเล

การแผ่ขยายของต้นผักบุ้งทะเลที่ปลูกบริเวณแปลงปลูกทั้ง 3 บริเวณ โดยวัดแนวความยาวของการเลื้อย พบว่า การแผ่ขยายของต้นผักบุ้งทะเล ในระยะ 30 วัน ต้นมีลักษณะเป็นทรงพุ่ม มีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน เมื่อผ่านไป 45 วัน พบว่า ต้นพันธุ์จากการแยกกอแปลงปลูกใต้ต้นสน (T5) มีอัตราการเจริญเติบโตค่อยๆลดลงและตายในที่สุด ต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกใต้ต้นสน (T4) และต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกใต้ต้นสน (T6) มีอัตราการเจริญเติบโตน้อยกว่าหน่วยการทดลองในแปลงปลูกบริเวณอื่นๆ อัตราการแผ่ขยายของต้นที่ 60 วัน พบว่า ต้นพันธุ์ซึ่งปลูกบริเวณแปลงปลูกริมทะเล ได้แก่ ต้นพันธุ์จากกอ (T7) ต้นพันธุ์จากการแยกกอ (T8) และต้นพันธุ์จากการปักชำ (T9) มีอัตราการแผ่ขยายดีที่สุด และเมื่อวัดอัตราการแผ่ขยายของต้นที่ 90 วัน พบว่า ต้นพันธุ์จากกอ (T7) มีอัตราการแผ่ขยายดีที่สุดและมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับหน่วยการทดลองอื่นๆ (Table 3, Figure 5)

Table 3 Expansion (cm) of *Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br* at plots for 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 days.

Treatments / day	0	15	30	45	60	75	90
T1 : Young plant from clump	8.9a	9.1a	9.4a	10.7c	14.8ab	27.7b	31.2c
T2: Young plant from cultivated clum	8.7a	8.9a	9.1a	10.5c	13.0b	27.5b	30.2c
T3: Young Plant from stem cutting	8.9a	9.1a	9.2a	10.8c	14.3ab	26.6b	30.8c
T4: Young plant from clump	7.5ab	7.7ab	7.9ab	8.0d	4.6d	5.3d	5.7e
T5: Young plant from cultivated	7.0b	7.0b	7.2b	7.1e	0e	0.0e	0.0f
T6: Young Plant from stem cutting	6.6b	6.8b	7.1b	7.4de	8.9c	11.1c	12.3d
T7: Young plant from clump	6.5b	6.8b	8.0ab	14.0a	16.9a	37.0a	43.8a
T8:Young plant from cultivated clump	6.4b	6.7b	7.3b	12.6b	16.9a	36.3a	38.7b
T9: Young Plant from stem cutting	6.7b	6.9b	7.3b	12.4b	17.0a	38.4a	39.6b

Notes: T1, T2, T3 : Young plant at roadsite plots

T4, T5, T6 : Young plant at under pine tree plots

T7, T8, T9 : Young plant at seasite plots

In the same column, the different letters following the represent significantly different ($p<0.05$) by DMRT

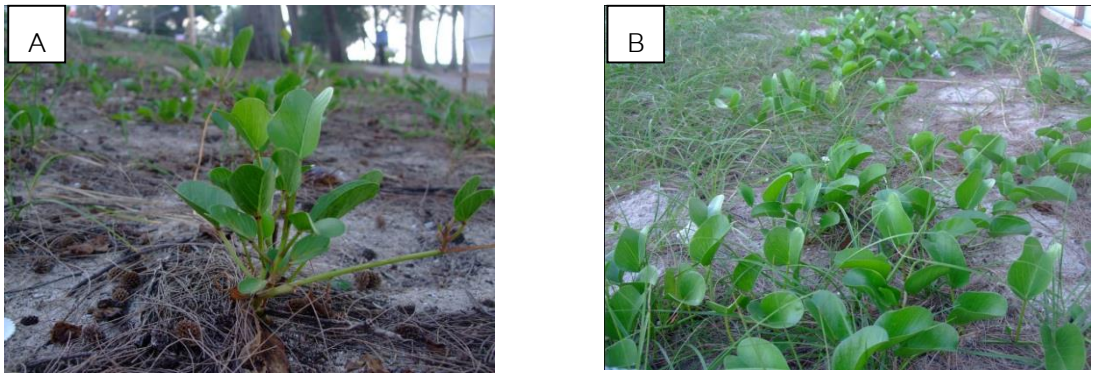


Figure 5 The expansion of *Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br*.

A : 30 days B : 90 days

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การแผ่ขยายของต้นผักบุ้งทะเลทั้ง 9 หน่วยการทดลอง พบว่า ต้นพันธุ์จากกอแปลงปลูกริมทะเล (T7) มีเปอร์เซ็นต์การแผ่ขยายมากที่สุด คิดเป็น 100% เมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยการทดลองอื่นๆ รองลงมา คือ ต้นพันธุ์จากการปักชำแปลงปลูกริมทะเล (T9) มีเปอร์เซ็นต์การแผ่ขยายมากคิดเป็น 90.41% และต้นพันธุ์จากการแยกกอแปลงปลูกริมทะเล (T8) มีเปอร์เซ็นต์การแผ่ขยายคิดเป็น 88.28% สำหรับแปลงปลูกริมถนนทั้ง 3 หน่วยการทดลอง มีเปอร์เซ็นต์การแผ่ขยายของลำต้นน้อยกว่าแปลงปลูกริมทะเลแต่มากกว่าแปลงปลูกใต้ต้นสน (Table 4)

Table 4 Perccentage of expansion of *Ipomoea pes-caprae(L.)R.Br* at plots for 90 days.

Treatment / Perccentage (%)								
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
71.21	68.96	70.39	13.04	0.00	27.98	100.00	88.28	90.41

สรุป

การปลูกผักบุ้งทะเล 3 ประเภท คือ ต้นพันธุ์จากกอ ต้นพันธุ์จากการแยกกอ และต้นพันธุ์จากการปักชำ ในแปลงปลูก 3 บริเวณ คือ บริเวณริมถนน บริเวณใต้ต้นสนและบริเวณริมทะเล พบว่าความสูงของต้นพันธุ์จากกอผักบุ้งทะเลซึ่งปลูกในแปลงปลูกบริเวณริมทะเล มีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุด คือ 57.21 เซนติเมตรและแตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับหน่วยการทดลองอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากได้รับแสงสว่างอย่างเต็มที่ ซึ่งเป็นสภาวะเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตตามธรรมชาติของต้นผักบุ้งทะเล รองลงมา คือ ต้นพันธุ์จากการปักชำทั้งในแปลงปลูกริมถนนและแปลงปลูกริมทะเล จำนวนใบของต้นผักบุ้งทะเล พบว่า ต้นพันธุ์จากกอบริเวณแปลงปลูกริมทะเล มีอัตราการเจริญเติบโตทางด้านจำนวนใบดีที่สุด คือ 37ใบและแตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับหน่วยการทดลองอื่นๆ รองลงมา คือ ต้นพันธุ์จากการกอและต้นพันธุ์จากการแยกกอแปลงปลูกริมทะเล การแผ่ขยายของต้นผักบุ้งทะเล พบว่า ต้นพันธุ์จากกอบริเวณแปลงปลูกริมทะเลมีเปอร์เซ็นต์การแผ่ขยายดีที่สุดเมื่อเทียบกับหน่วยการทดลองอื่นๆ รองลงมา คือ ต้นพันธุ์จากการปักชำและต้นพันธุ์จากการแยกกอแปลงปลูกริมทะเล ดังนั้น จึงควรขยายพันธุ์ต้นผักบุ้งทะเล โดยใช้ต้นพันธุ์จากกอและปลูกในที่โล่งแจ้ง เพื่อให้ได้รับแสงสว่างเต็มที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้งทะเล

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนงานวิจัย เรื่อง ศึกษาระบบการปลูกผักบุ้งทะเลเป็นพืชคลุมดินบริเวณชายหาดชลาทัศน์ ประจำปีงบประมาณ 2556 และขอขอบคุณเทศบาลนครสงขลา ที่อนุญาตให้ใช้พื้นที่บริเวณชายหาดชลาทัศน์เพื่อดำเนินโครงการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ไตรเทพ วิชย์โกวิทเทน. 2556. อัตราการรอดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าไม้แสมขาว (*Avicennia alba*) ในดินตะกอนที่มีระยะห่างจากแนวชายฝั่งแตกต่างกัน. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. 21:120.

ศูนย์อุตุนิยมวิทยาทะเล. 2549. ภูมิอากาศจังหวัดสงขลา. **สำนักเฝ้าระวังและเตือนสภาวะอากาศกรมอุตุนิยมวิทยา**, แหล่งที่มา : http:// www.marine.tmd.go.th/ thai/tus_type/songkhla.html,15 พฤศจิกายน 2558.

วิทยา บุญวรพัฒน์. 2554. **สารานุกรมสมุนไพรไทย-จีนที่ใช้บ่อยในประเทศไทย**. สำนักพิมพ์พิมพ์ลักษณ์. กรุงเทพฯ : 346.

สำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 6. 2555. **รายงานประจำปี 2555**. กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช กระทรวงทรัพยากรสัตว์ป่าและสิ่งแวดล้อม.

Matsi, T. and Keramidas V.Z. 1998. Fly ash application on two acid soils and its effect on soil salinity , pH, B, P and on ryegrass growth and composition. **Environmental Pollution**. 104:107-112.

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณกับผลผลิตสับปะรดโรงงาน โดยใช้ข้อมูลดาวเทียม Landsat 8

Study on Relation between Vegetation Index with Pineapple Production from Landsat 8

บุษราวัลย์ ศรีเลิศวรกุล* และ ปรีชา ธรรมานนท์

Buchsarawan Srilertworakul* and Pricha Dhanmanonda

บทคัดย่อ

การประมาณเนื้อที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงาน อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จากข้อมูลดาวเทียม Landsat 8 โดยใช้ข้อมูลในช่วงเวลาที่มีการเพาะปลูกสับปะรดโรงงานที่กำลังเจริญเติบโตเต็มที่ นำมาผสมสีภาพถ่ายดาวเทียม และทำการจำแนกพื้นที่โดยใช้วิธีการแปลและวิเคราะห์ด้วยสายตา โดยเลือกข้อมูลที่สามารถแยกแยะพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานที่เด่นชัด และเทียบเคียงพื้นที่กับข้อมูลจาก Google Earth ผลการจำแนกสามารถประมาณเนื้อเพาะปลูกได้ประมาณ 44,621.20 ไร่ และนำผลที่ได้ตรวจสอบความถูกต้องด้วยการลงพื้นที่สำรวจภาคสนาม ผลการตรวจสอบพบว่ามีร้อยละความถูกต้อง เท่ากับ 95.73 ถือว่าความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (มากกว่า ร้อยละ 80) สำหรับค่าดัชนีพืชพรรณของตัวอย่างสุ่มพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงาน จำนวน 30 แปลงตัวอย่าง มีค่า IRR อยู่ระหว่าง 0.28 – 1.51, ค่า VEGINDEX อยู่ระหว่าง 10 – 45 และค่า NDVI อยู่ระหว่าง 0.27 – 0.43 เมื่อนำค่าดัชนีพืชพรรณมาหาความสัมพันธ์กับผลผลิตที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม แสดงให้เห็นว่า ค่า IRR มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.20 ซึ่งแสดงว่า 20% ของการแปรผันผลผลิตสับปะรดโรงงาน (Yield) เป็นผลเนื่องมาจากมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า IRR และสำหรับค่า VEGINDEX กับค่า NDVI มีค่า R^2 เท่ากับ 0.02 และ 0.16 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRR กับผลผลิตที่ได้จากการสำรวจ น่าจะนำมาใช้ในการพยากรณ์ผลผลิตได้ดีที่สุด จากทั้ง 3 วิธี

ABSTRACT

This study estimates pineapple area from Landsat 8 satellite imagery in Mueang District Prachuap Khiri Khan Province. Using Landsat 8 satellite imagery during pineapple area is peak growing and apply to composite bands RGB for classification by Visual interpretation methods. and selected data is an identify a pineapple plantations areas to compare the results with data from Google Earth. For classification can be estimate cultivated area approximately is 44,621.20 rai. The result was determine accuracy to field survey. The result of accuracy 95.73% is considered to acceptable (80 percent) for the vegetation index random sample 30 plots of pineapple plantations.

Key Words : IRR, VEGINDEX, NDVI, Landsat 8

*Corresponding author, email address : b_samsri@hotmail.com

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900

The IRR is between 0:28 to 1:51, the VEGINDEX between 10-45 and the NDVI is between 0:27 to 0:43 When the vegetation index was correlated with output from field survey. Shows the IRR with correlation coefficient (R^2) was 0.20, indicating that 20% of the variation pineapple areas(Yield) as a result of linear relationship with the IRR and for the VEGINDEX with the NDVI. The R^2 of 0.02 and 0.16 respectively that mean IRR equation can forecast pineapple yield. It's most suitable to forecast yield.

คำนำ

สับปะรดเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย การวางแผนในการส่งเสริมการผลิตสับปะรดโรงงานภายในประเทศจึงเป็นสิ่งจำเป็น ข้อมูลจากการประเมินผลผลิตที่ถูกต้องและแม่นยำเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยในการวางแผนการผลิต แต่การประเมินที่รวดเร็วและถูกต้องทำได้ยาก ปัจจัยที่จะช่วยในการวางแผนการผลิต คือ การคาดการณ์แนวโน้มของผลผลิต เนื้อที่เพาะปลูก โซนเพาะปลูก กับที่ตั้งของโรงงาน และที่ผ่านมามีการพัฒนาด้านการเกษตรอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะการสำรวจข้อมูลดาวเทียม เพื่อสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ (remote sensing) การศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการประมาณเนื้อที่เพาะปลูก และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพืชพรรณกับผลผลิตสับปะรดโรงงานในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งเป็นอำเภอที่มีพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุด โดยดัชนีพืชพรรณดังกล่าวนี้มีการคำนวณค่าสมการด้วยวิธีการต่างๆ ของข้อมูลดาวเทียม Landsat 8 ร่วมกับการวิเคราะห์พื้นที่เพาะปลูกสับปะรดจากการแปลด้วยสายตา พร้อมกับตรวจสอบความถูกต้องข้อมูล โดยการลงพื้นที่สำรวจและตรวจสอบพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตสับปะรดโรงงาน อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้ข้อมูลดาวเทียม Landsat 8 ให้เกิดประโยชน์ทางด้านการเกษตร และเป็นการพยากรณ์ผลผลิตสับปะรดโรงงาน สำหรับเป็นแนวทางในการพยากรณ์ผลผลิตการเกษตรพืชอื่นอย่างยั่งยืน และอาจจะเป็นแนวทางในการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืชอื่นต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การรวบรวมและเตรียมข้อมูล

รวบรวมและเตรียมข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 ระวางที่ Path 129 Row 052 ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ในระหว่างช่วงเดือนมกราคม – กุมภาพันธ์ พ.ศ.2558 จากเว็บไซต์ http://earthexplorer.usgs.gov ซึ่งเป็นข้อมูลเผยแพร่ของสำนักธรณีวิทยา สหรัฐอเมริกา โดยมีรายละเอียดของภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 ครอบคลุมพื้นที่ 185 กิโลเมตร และมีระบบบันทึกภาพ 2 ชนิด คือ Operational Land Imager (OLI) และ Thermal Infrared Sensor (TIRS) มี 11 ช่วงคลื่น (Bands) ซึ่งช่วง ช่วงคลื่นที่ 1-7 และ 9 มีรายละเอียดจุดภาพ 30 เมตร สำหรับ ช่วงคลื่นที่ 8 (Panchromatic) มีรายละเอียดจุดภาพ 15 เมตร และ ช่วงคลื่นที่ 10, 11 อินฟาเรดความร้อน 1, 2 (Visible, NIR, SWIR) มีรายละเอียดจุดภาพ 100 เมตร จากนั้นนำภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 มาผสมสีเท็จ ช่วงคลื่น R:5 G:6 B:3 และตัดภาพถ่ายดาวเทียมเฉพาะบริเวณพื้นที่ศึกษา อำเภอเมืองประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

การจำแนกข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานด้วยสายตา

เลือกข้อมูลดาวเทียมในช่วงเวลาที่มีการเพาะปลูกสับปะรดโรงงานที่กำลังเจริญเติบโตเต็มที่ (เดือนมกราคม – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558) และทดลองผสมสีภาพถ่ายดาวเทียมในแต่ละช่วงคลื่น โดยเลือกข้อมูลที่

สามารถแยกแยะพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานที่เด่นชัด ซึ่งมีลักษณะเด่นในเรื่องของความชื้น การสะท้อนแสงของพืชพืชพรรณ และความแตกต่างของสภาพพื้นที่ รวมทั้งสภาพแวดล้อมบริเวณใกล้เคียง เพื่อการจำแนกพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงาน ซึ่งการแปลและวิเคราะห์ข้อมูลดาวเทียมการจำแนกพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานจะใช้วิธีการแปลและวิเคราะห์ด้วยสายตา และนำมาตรวจสอบกับข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจาก โปรแกรม Google Earth ที่สามารถเห็นรายละเอียดลักษณะสิ่งปกคลุมภูมิประเทศได้ชัดเจน โดยใช้โปรแกรม QGIS 2.2.0 และ Arc GIS 10.1

การกำหนดกลุ่มตัวอย่าง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและการสำรวจผลผลิตของสับปะรดโรงงาน

กำหนดจำนวนตัวอย่างพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานในรูปแบบตารางกริด 1000x1000 เมตร หรือ 625 ไร่ โดยวิธีการของ Yamane (1976) ที่ขนาดความคลาดเคลื่อน $\pm$10% จากจำนวนพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานทั้งหมดที่จำแนกได้ด้วยสายตา โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% ยอมให้มีความผิดพลาดได้ 10% มีสูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$n = N/(1+Ne^2)$$

เมื่อ n = จำนวนตัวอย่างที่จะต้องทำการสุ่ม

N = จำนวนประชากรทั้งหมด

e = ค่าความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่าง

กำหนดกลุ่มตัวอย่างแบบมีระบบ โดยใช้วิธีสุ่มตัวอย่างแรกก่อนเป็นการเริ่มต้นในการสุ่มตัวอย่างแบบมีระบบต่อไป โดยกำหนดช่วงห่างเท่าๆ กัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร ค่าช่วงชั้น = จำนวนจำนวนพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานทั้งหมด (ตารางกริด) / จำนวนตัวอย่างพื้นที่เพาะปลูก (ตารางกริด) ที่ได้จากการคำนวณข้างต้น จากนั้นทำการสุ่มเลือกจุดสำรวจตัวอย่างในแต่ละหน่วยพื้นที่ตัวอย่าง โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบมีระบบ (Systematic Random Sampling) (บุญธรรม, 2540) ซึ่งคำนวณจากพื้นที่ตัวอย่างที่ได้เลือกไว้ตามบัญชีสุ่มมานับจำนวน Unit แบบตารางกริด ขนาด 10,000 ตารางเมตร หรือ 6.25 ไร่ โดยเริ่มต้นเรียงจากด้านบนสู่ด้านล่าง จากซ้ายไปขวา และจากขวามาซ้ายสลับกันไปเรื่อยๆ ในแต่ละพื้นที่ตัวอย่าง แล้วนำมาหาช่วงชั้น โดยกำหนดเลือกจุดสำรวจมา 3 จุด (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2549) และนำตัวอย่างที่ได้จากการสุ่มมาตรวจสอบในพื้นภาคสนาม และนำข้อมูลที่สำรวจภาคสนามมาคำนวณหาร้อยละของความถูกต้อง สำหรับการวิเคราะห์การคำนวณหาร้อยละของความถูกต้องในการแปลและวิเคราะห์ข้อมูลเนื้อที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงาน ซึ่งผลของการคำนวณร้อยละของความถูกต้องที่ยอมรับได้ ต้องมีผลความถูกต้องโดยรวมไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 (Short, 1982) โดยใช้สูตรในการคำนวณความถูกต้อง (Map Accuracy) ดังนี้ (สุพรรณ, 2535)

$$\text{ร้อยละของความถูกต้อง} = \frac{\text{จำนวนจุดภาพที่ถูกต้อง}}{\text{จำนวนจุดภาพที่ถูกต้อง} + \text{ผลรวมจำนวนจุดภาพของ Omission} + \text{ผลรวมจำนวนจุดภาพของ Commission}} \times 100$$

เมื่อ Omission คือ ความผิดพลาดในการจำแนกประเภทข้อมูล ที่ไม่ได้จำแนก หรือตกหล่น

Commission คือ ความผิดพลาดในการจำแนกข้อมูลที่รวมเอาข้อมูลอื่นมาปนอยู่ด้วย

สำหรับการสำรวจผลผลิตของสับปะรดโรงงาน ดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามในการเก็บข้อมูลผลผลิตจากเกษตรกร ในช่วงที่มีการเก็บเกี่ยว ซึ่งทำการลงพื้นสำรวจในตำแหน่งแปลงตัวอย่างที่ได้จากการสุ่ม

การวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานร่วมกับผลผลิตที่ได้จากการสำรวจ

นำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ได้จากการจำแนกพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานด้วยสายตา มาวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่

1) Simple Division (IRR) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณการสะท้อนพลังงาน ในช่วงคลื่นอินฟาเรดใกล้กับช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง สามารถคำนวณได้จากสูตร $IRR = \frac{NIR}{RED}$

2) Vegetation Index (VEGINDEX) เป็นค่าความแตกต่างระหว่างช่วงคลื่นอินฟาเรดใกล้ดับช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง สามารถคำนวณได้จากสูตร $VEGINDEX = NIR - RED$

3) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) เป็นการนำค่าความแตกต่างของการสะท้อนของพื้นผิว ระหว่างช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรดกับช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดงมาทำสัดส่วนกับค่าผลบวกของทั้งสองช่วงคลื่นเพื่อปรับให้เป็นลักษณะการกระจายแบบปกติ สามารถคำนวณได้จากสูตร $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$

จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณและผลผลิตที่ได้จากการสำรวจมาหาความสัมพันธ์โดยการสร้างสมการเส้นตรงเชิงเดี่ยว (regression linear equation) เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการพยากรณ์ผลผลิตสับปะรดโรงงาน

ผลและวิจารณ์

ผลการรวบรวมข้อมูลและเตรียมข้อมูล

นำข้อมูลข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 เมื่อวันที่ 20 มกราคม พ.ศ. 2558 โดยเลือกทั้งหมด 4 ช่วงคลื่น เพื่อใช้ในการผสมสีสำหรับการจำแนกพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงาน ซึ่งได้แก่ ช่วงคลื่นตามองเห็นสีเขียว (Band 3) มีขนาดช่วงคลื่น 0.53 – 0.59 ไมโครเมตร ช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง (Band 4) มีขนาดช่วงคลื่น 0.64 – 0.67 ไมโครเมตร ช่วงคลื่นอินฟาเรดใกล้ (Band 5) มีขนาดช่วงคลื่น 0.85 – 0.88 และช่วงคลื่นอินฟาเรดช่วงสั้น 1 (Band 6) มีขนาดช่วงคลื่น 1.57 – 1.65 โดยทุกช่วงคลื่นมีรายละเอียดจุดภาพ 30 เมตร และนำมาจำแนกด้วยสายตา ได้แก่ช่วงคลื่น R:5 G:6 B:3 ดังแสดงใน Figure 1A

ผลการจำแนกข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานด้วยสายตา

ผลการจำแนกข้อมูลดาวเทียม Landsat 8 พื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงาน ปี 2558 ช่วงเดือนมกราคม – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 มีเนื้อที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานในอำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จำนวน 44,621.20 ไร่ และใน Figure 1B แสดงเนื้อที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานที่ได้จำแนกด้วยสายตา ซึ่งมีจำนวนพื้นที่ตัวอย่างทั้งหมด 933 ตัวอย่าง(ตารางกริด) และทำการกำหนดจำนวนตัวอย่างสุ่ม ตามวิธีของ Yamane (1976) ที่ขนาดความคลาดเคลื่อน $\pm$10% ดังนั้น จำนวนจุดตัวอย่างสุ่ม = $933/(1+(933 \times 0.1^2)) = 90$ ตัวอย่างตารางกริด ทำการสุ่มตัวอย่างแบบมีระบบ (systematic random sampling) โดยลักษณะการสุ่มจะมีการกำหนดช่วงห่างของตัวอย่างระยะห่างเท่าๆ กัน จากการคำนวณพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงาน ด้วยวิธีการแปลด้วยสายตาที่อยู่ในตารางกริด 1,000x1,000 เมตร หรือ 625 ไร่

การสุ่มตัวอย่างแบบมีระบบดังกล่าวแสดงใน Figure 1C เพื่อใช้ในการสำรวจความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ทำการจำแนกด้วยสายตาจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 และนำไปวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณต่อไป

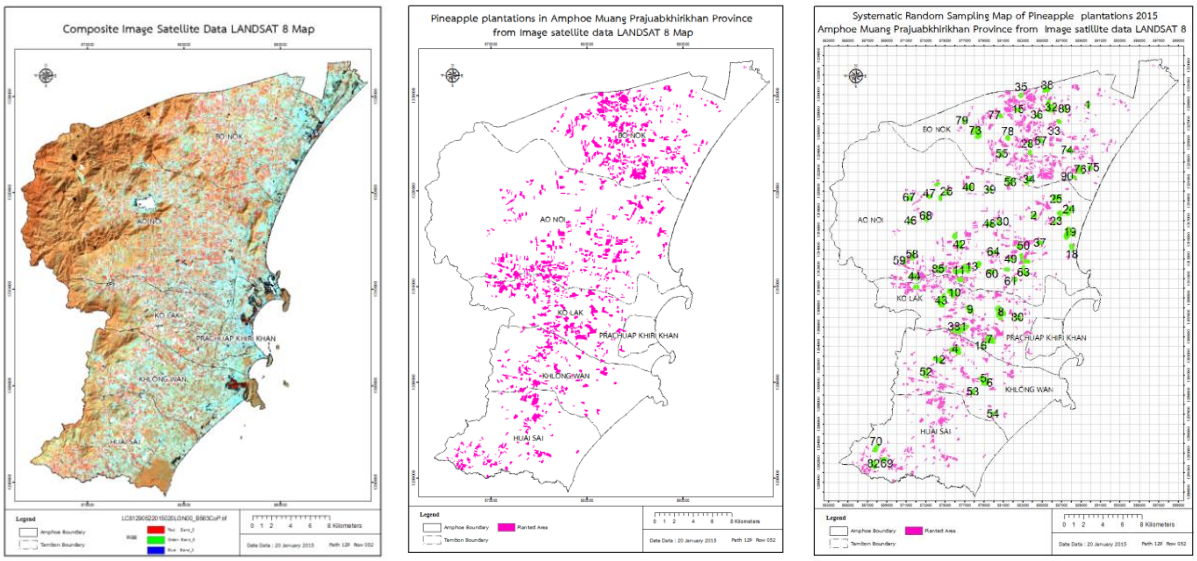


Figure 1 Composite bands Landsat 8 (A), Pineapple area (B) and sample Random Method (C).

ผลการตรวจสอบข้อมูลจากการจำแนกด้วยสายตาและการสำรวจผลผลิตสับปะรด

จากการลงพื้นที่ภาคสนามเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการจำแนกด้วยสายตา (Figure 2) และร้อยละความถูกต้องของข้อมูลที่ได้สำรวจ $= \frac{1,579.80}{1,579.80+0+29.75} \times 100 = 98.15$



Figure 2 Field survey Accuracy.

ซึ่งค่าความถูกต้องมากกว่าร้อยละ 80 (ค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้) สำหรับพื้นที่ที่คาดว่าจะเป็นพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานจะออกสีชมพูค่อนส้มอมแดง และมีรูปแบบแปลงเพาะปลูกที่เด่นชัด สำหรับการสำรวจผลผลิตสับปะรดโรงงานในบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยการทำแบบสอบถามเกษตรกรในพื้นที่ตัวอย่างสุ่ม จำนวน 30 แปลงตัวอย่าง พบว่าค่าผลผลิตสับปะรดในช่วง 2,561 – 4,181 กิโลกรัม/ไร่/ปี ผลผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 3,258 กิโลกรัม/ไร่/ปี ซึ่งรายละเอียดแสดงดัง Table 1

ผลการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานร่วมกับผลผลิตจากการสำรวจ

จากตัวอย่างจำนวน 30 แปลงตัวอย่าง นำมาศึกษาปริมาณการสะท้อนพลังงานช่วงคลื่นตามองเห็นสีเขียว มีขนาดช่วงคลื่น 0.53 – 0.59 ไมโครเมตร ช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง มีขนาดช่วงคลื่น 0.64 – 0.67 ไมโครเมตร ช่วงคลื่นอินฟาเรดใกล้ มีขนาดช่วงคลื่น 0.85 – 0.88 และช่วงคลื่นอินฟาเรดช่วงสั้น 1 มีขนาดช่วงคลื่น 1.57 – 1.65 พิจารณาประกอบกับการหาค่าดัชนีพืชพรรณในวิธีต่างๆ จำนวน 3 วิธี ได้แก่ IRR VEGINDEX และ NDVI โดยมีสูตรการคำนวณดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อวิธีการ ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีพืชพรรณแต่ละวิธีพบว่าวิธี IRR มีค่าอยู่ระหว่าง 0.28 – 1.51 วิธี VEGINDEX มีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 45 และวิธี NDVI มีค่าอยู่ระหว่าง 0.27 – 0.43 ซึ่งแผนที่แสดงดัชนีพืชพรรณในแต่ละวิธีแสดงดัง Figure 3

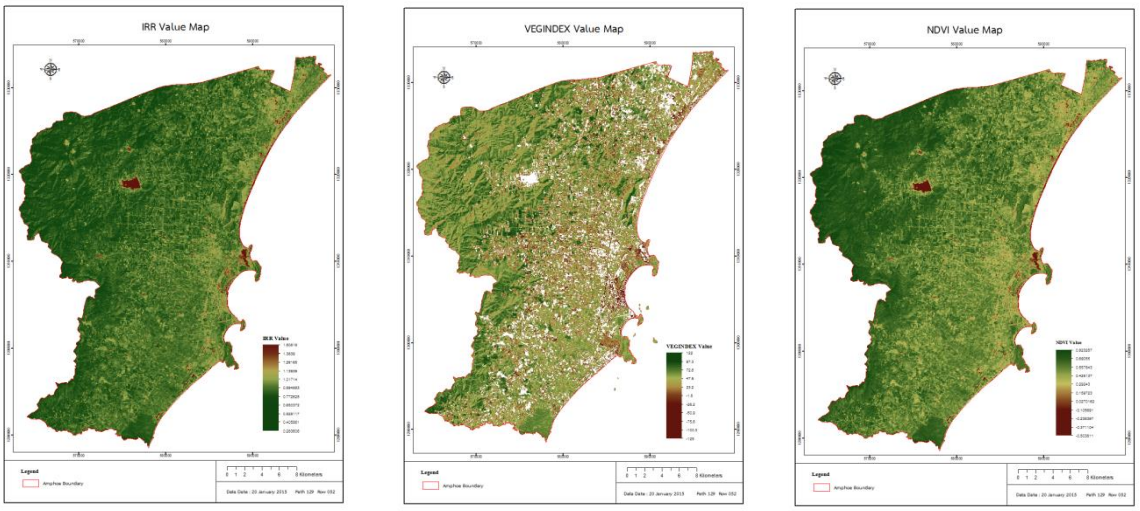


Figure 3 IRR Map, VEGINDEX Map, NDVI map

เมื่อนำค่าผลผลิตต่อไร่ของสับปะรดโรงงาน (Yield) ที่ได้จากทำแบบสอบถามเกษตรกรมาคำนวณร่วมกับค่าดัชนีพืชพรรณที่คำนวณได้ในแต่ละวิธี เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ในรูปแบบสมการเส้นตรงเชิงเดี่ยว Yield = a + b(ค่าดัชนีพืชพรรณ) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRR กับค่าผลผลิตสับปะรดโรงงานจากการสำรวจ คือ Yield = 4,912.4 – 3,597.4(IRR) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.20 หมายความได้ว่า 20% ของการแปรผันผลผลิตสับปะรดโรงงาน (Yield) เป็นผลเนื่องมาจากมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า IRR

2) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า VEGINDEX กับค่าผลผลิตสับปะรดโรงงานจากการสำรวจ คือ Yield = 3,425.4 – 7.6178(VEGINDEX) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.02 หมายความได้ว่า 2% ของการแปรผันผลผลิตสับปะรดโรงงาน (Yield) เป็นผลเนื่องมาจากมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า VEGINDEX

3) สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า NDVI กับค่าผลผลิตสับปะรดโรงงานจากการสำรวจ คือ Yield = 1,845.8 + 3,774.1(NDVI) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.16 หมายความได้ว่า 16% ของการแปรผันผลผลิตสับปะรดโรงงาน (Yield) เป็นผลเนื่องมาจากมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า NDVI

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีพืชพรรณทั้ง 3 วิธี กับค่าผลผลิตสับปะรดโรงงานจากการสำรวจแสดงดัง Figure 4 จากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นพบว่า ค่า IRR มีความสัมพันธ์กับค่าผลผลิตสับปะรดโรงงานดีที่สุดจากทั้ง 3 วิธี ดังนั้นค่า IRR น่าจะสามารถนำมาพยากรณ์ค่าผลผลิตสับปะรดโรงงาน ได้ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ซึ่งผลผลิตสับปะรดโรงงานที่พยากรณ์ได้จาก สมการความสัมพันธ์ของค่า IRR กับ Yield แสดงดัง Table 1

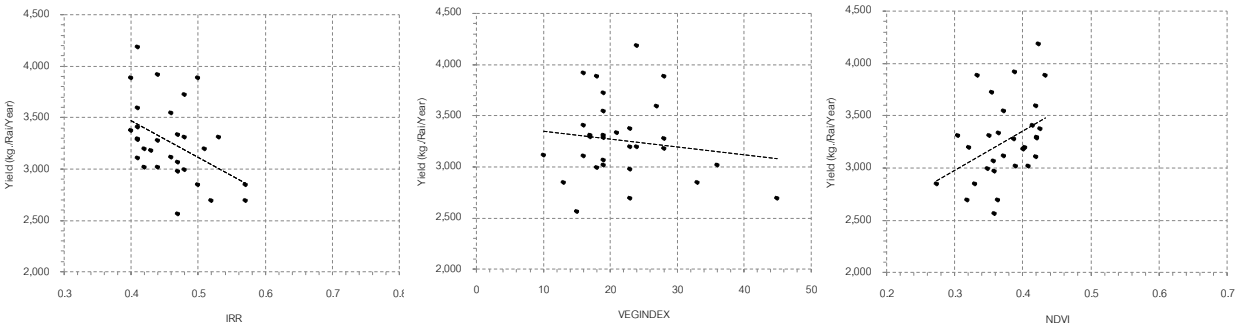


Figure 4 IRR graph, VEGINDEX graph, NDVI graph.

Table 1 Results of yield from survey and results from IRR equation.

Plot	UTM		Tambon Name	Yield from survey	IRR	Yield from IRR equation
	East	North		(Kg/Rai)		(Kg/Rai)
1	589,734	1,328,887	BO NOK	3,329	0.47	3,221.62
2	584,158	1,317,496	AO NOI	3,882	0.40	3,473.44
3	575,919	1,305,636	KO LAK	3,593	0.41	3,437.47
4	576,047	1,303,684	KHLONG WAN	3,291	0.41	3,437.47
5	578,805	1,300,650	KHLONG WAN	2,561	0.47	3,221.62
6	579,127	1,300,217	KHLONG WAN	3,279	0.44	3,329.54
7	579,588	1,304,719	KO LAK	3,376	0.40	3,473.44
8	580,656	1,307,446	KO LAK	2,691	0.52	3,041.75
9	577,317	1,308,023	KO LAK	3,192	0.42	3,401.49
10	575,758	1,309,518	KO LAK	2,849	0.57	2,861.88
11	576,222	1,311,763	AO NOI	3,102	0.41	3,437.47
12	574,501	1,302,569	KHLONG WAN	2,847	0.50	3,113.70
13	577,148	1,312,172	AO NOI	3,543	0.46	3,257.60
14	577,314	1,311,933	AO NOI	3,306	0.48	3,185.65
15	582,493	1,328,430	BO NOK	3,918	0.44	3,329.54
16	578,974	1,304,024	KO LAK	2,971	0.47	3,221.62
17	585,626	1,329,077	BO NOK	3,061	0.47	3,221.62
18	588,023	1,314,284	AO NOI	3,883	0.50	3,113.70
19	587,948	1,315,860	AO NOI	3,177	0.43	3,365.52
20	587,495	1,315,413	AO NOI	2,688	0.57	2,861.88
21	586,193	1,316,793	AO NOI	3,307	0.53	3,005.78
22	586,732	1,317,093	AO NOI	4,181	0.41	3,437.47
23	586,884	1,317,778	AO NOI	3,112	0.46	3,257.60
24	587,568	1,317,990	AO NOI	3,019	0.42	3,401.49
25	586,391	1,319,323	AO NOI	3,283	0.41	3,437.47
26	580,513	1,316,967	AO NOI	3,402	0.41	3,437.47
27	575,157	1,319,917	AO NOI	2,992	0.48	3,185.65
28	574,501	1,319,307	AO NOI	3,013	0.44	3,329.54
29	583,646	1,324,948	BO NOK	3,197	0.51	3,077.73
30	576,429	1,305,484	KO LAK	3,719	0.48	3,185.65

สรุป

ผลของการจำแนกพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงาน สามารถประมาณเนื้อเพาะปลูกได้จำนวน 44,621.20 ไร่ และผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำแนกพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานนั้น พบว่ามีร้อยละความถูกต้อง เท่ากับ 95.73 ในส่วนค่าดัชนีพืชพรรณสำหรับตัวอย่างสุ่มพื้นที่เพาะปลูกสับปะรดโรงงานจำนวน 30 แปลงตัวอย่างมีค่า IRR อยู่ระหว่าง 0.28 – 1.51, ค่า VEGINDEX อยู่ระหว่าง 10 – 45 และค่า NDVI อยู่ระหว่าง 0.27 – 0.43 เมื่อนำค่าดัชนีพืชพรรณเหล่านี้มาหาความสัมพันธ์กับผลผลิตสับปะรดโรงงานที่ได้จากการสำรวจ แสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจาณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ ค่า IRR มีความสัมพันธ์กับค่าผลผลิตสับปะรดโรงงานดีที่สุดในการหาค่าดัชนีพืชพรรณ ทั้ง 3 วิธี

เอกสารอ้างอิง

บุญธรรม กิจปรีดาบริสุทธิ์. 2540. **ระเบียบวิธีการวิจัยทางสังคมศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่7. โรงพิมพ์และปกเจริญผล, กรุงเทพฯ.

สุพรรณ การจนสุธรรม. 2535. **หลักการวิเคราะห์ข้อมูลดาวเทียมด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์**. ศูนย์สำรวจทรัพยากรการเกษตรด้วยดาวเทียม สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. 2549. วิธีการสำรวจเนื้อที่เพาะปลูกของสินค้าเกษตรปีโดยใช้พื้นที่หน่วยสุ่มเป็นกรอบตัวอย่าง, น. 4-5. ใน **เอกสารประกอบการสัมมนาแนวทางการพัฒนาการสำรวจเนื้อที่เพาะปลูกและผลผลิตสินค้าเกษตรระหว่างวันที่ 29-31 มกราคม**. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กรุงเทพฯ.

Short, N.M. 1982. **The Landsat Tutorial Workbook. Basics of Satellite Remote Sensing**. NASA Reference Publication 1078, Washington D.C.

Yamane, T. 1976. **Statistics: An Introductory Analysis**. 2nd ed. Harper and Row Publications, New York.

การคัดแยกและจัดจำแนกแอคติโนแบคทีเรียจากดินชายหาดแม่รำพึง และศักยภาพการย่อยสลายทางชีวภาพของปิโตรเลียม ไฮโดรคาร์บอน

Isolation and Identification of Actinobacteria from Mae Ramphueng beach soil and the Biodegradation Potential of Petroleum Hydrocarbon

ธงชัย เฟาสันเทียะ* นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์

Tongchai Fousanthia Nipon Tungkananuruk and Kanita Tungkananuruk

บทคัดย่อ

ทำการคัดแยกแอคติโนแบคทีเรียย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นโดยเก็บตัวอย่างดินชายหาดบริเวณชายหาดแม่รำพึง สามารถคัดแยกแอคติโนมัยซีสได้จำนวน 25 ไอโซเลต มีแอคติโนมัยซีส 11 ไอโซเลตที่สามารถย่อยสลายสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (PHC) โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นเป็นแหล่งคาร์บอน โดยไอโซเลต MRBR011, MRBR012, MRBR019 และ MRBR022 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลาย PHC ได้ดี ในอาหารที่เตรียมจากน้ำกลั่นที่มีน้ำมันหล่อลื่นเข้มข้นร้อยละ 0.5% v/v ร้อยละโดยน้ำหนักที่หายไปของน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 63.33, 53.07, 49.37 และ 54.12 ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้วไอโซเลต MRBR022 ยังมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นดีที่สุดในสภาวะน้ำเค็ม (อาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมจากน้ำทะเล) และมีค่าร้อยละโดยน้ำหนักที่หายไปของน้ำมันหล่อลื่นเท่ากับ 70.66 นอกจากนั้นแอคติโนมัยซีสทั้ง 11 ไอโซเลตถูกระบุชนิดด้วยยีน 16S rRNA จากการเปรียบเทียบลำดับพบว่าไอโซเลตทั้งหมดมีค่าความเหมือนกับ *Streptomyces* สูง (99.44 to 99.93%).

ABSTRACT

Actinobacterias were isolated form Mae Ramphueng beach soil samples. A total 25 isolates of actinomycetes were obtained. Eleven isolates of them were able to degrade petroleum hydrocarbon (PHC) in the medium supplemented with lubricant as a carbon source. The strain MRBR011, MRBR012, MRBR019 and MRBR022 exhibited higher effective PHC degradation, and percentage of lubricant weight loss at 63.33, 53.07, 49.37 and 54.12 respectively in the medium of distilled water supplemented with 0.5% v/v lubricant. Moreover, isolate MRBR022 showed a highest activity in degrading lubricant in saline condition (culture medium was prepared from sea water) and 70.66% of weight loss was acheived. In addition eleven of isolates were identifed by 16S rRNA sequence. Sequence comparison revealed that all isolates belonged to *Streptomyces* with high identities (99.44 to 99.93%)

Key Words: Actinobacteria, degradation, Identification, 16S rRNA gene

*Corresponding author; e-mail address: kun_tongo@hotmail.com

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environment Science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

ในปัจจุบันการปนเปื้อนคราบน้ำมันในสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากประเทศไทยมีนโยบายในการพัฒนาประเทศด้านต่างๆ ทั้งทางด้านการเพาะเลี้ยงชายฝั่ง การท่องเที่ยว การขนส่งทางทะเล และโดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ควบคู่ไปกับความต้องการพลังงานภายในประเทศที่เพิ่มสูงขึ้น การพัฒนาและความต้องการเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนสารปิโตรเคมีจากการรั่วไหลของน้ำมัน เช่น อุบัติเหตุจากเรือ การขุดเจาะน้ำมัน อุบัติเหตุระหว่างการขนถ่ายน้ำมัน โดยจากสถิติมีเหตุการณ์การรั่วไหลของน้ำมันทางทะเลของประเทศไทยที่สำคัญ เช่น เหตุการณ์เมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ.2544 เกิดอุบัติเหตุน้ำมันรั่วไหลจากท่อขนถ่ายน้ำมันกลางทะเลของบริษัท อัลลายแอนซ์ รีไฟนิ่ง จำกัด หลุดออกจากกันเป็นเหตุให้น้ำมันดิบรั่วไหลปริมาณ 30 ตัน เหตุการณ์เมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ.2550 น้ำมันดิบปริมาตร 1.1 บาเรล รั่วไหลจากแท่นขุดเจาะน้ำมัน ของบริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) และล่าสุดเกิดเหตุการณ์เมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2556 น้ำมันดิบปริมาตร 50 ตัน รั่วไหลจากท่อน้ำมันดิบขนาด 16 นิ้ว ของบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) (กรมเจ้าท่า, 2556) น้ำมันหรือสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่รั่วไหลส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีทั้งสารประกอบ อะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbons) และไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (cyclic aromatic hydrocarbons) จัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic compound) น้ำมันจึงมีคุณสมบัติในการละลายน้ำที่ต่ำ สามารถคงสภาพในแหล่งน้ำได้นาน คราบน้ำมันจึงเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางทะเล เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทั้งในระยะเวลาสั้นและระยะยาว สิ่งมีชีวิตในบริเวณดังกล่าวมีการสะสมสารพิษและเกิดความผิดปกติในการดำรงชีวิต

จากเหตุผลดังกล่าวทำให้มีการเร่งบำบัดและกำจัดคราบน้ำมันด้วยกระบวนการวิธีการต่างๆ ทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ โดยเฉพาะการใช้สารเคมีในการบำบัดซึ่งเป็นที่นิยมในหลายประเทศ แต่เนื่องจากการใช้สารเคมีในการบำบัดนั้นมีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อน และอาจจะมีสารพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้ วิธีการบำบัดทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่กำลังได้รับความสนใจ โดยการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายคราบน้ำมัน (microbial degradation of petroleum hydrocarbon) หรือเรียกว่ากระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ (effective microorganism) ในการย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่ตรงหรือสารประกอบอะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอน โดยการคัดแยกและคัดเลือกแบคทีเรียกลุ่ม แอคติโนแบคทีเรีย (actinobacteria) จากตัวอย่างดินในบริเวณชายหาดแม่รำพึง จังหวัดระยอง มาทำการทดสอบความสามารถและประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ ซึ่งผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะสามารถประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหามลพิษทางทะเล และช่วยลดต้นทุนในการใช้สารเคมีบำบัด

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

ดินชายหาด โดยเก็บตัวอย่างดินชายหาด จากบริเวณชายหาดแม่รำพึง จังหวัดระยอง เก็บที่ระดับความลึก 0 – 15 เซนติเมตร ใส่ถุงพลาสติกและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (วิชุดา, 2553)

น้ำทะเล โดยเก็บตัวอย่างน้ำทะเล จากบริเวณชายหาดแม่รำพึง จังหวัดระยอง เก็บใส่ถังพลาสติกที่มีฝาปิดสนิทปริมาตร 20 ลิตร จำนวน 2 ถัง

น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ และอาหารเลี้ยงเชื้อ ได้แก่ Manital Soybean Agar (MS) และ Nutrient Broth (NB)

การคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีสจากดินชายหาด

ใส่ตัวอย่างดินชายหาด น้ำหนัก 1 กรัม ลงในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอาหาร NB ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บ่มเชื้อโดยเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน หรือจนกว่าเชื้อจะเจริญ (Mercade *et al.,* 1996) จากนั้นถ่ายเชื้อ 10% ลงในอาหารใหม่ และเลี้ยงตามวิธีเดิมอีก 3 ครั้ง จากนั้นปิเปตตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร โดยทำการเจือจางแบบ serial dilution ลงบนอาหาร MS (ที่มีการเติมยาปฏิชีวนะแอมพิซิลิน (ampicillin) 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) ทำการเกลี่ยให้ทั่วด้วยวิธี spread plate นำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงทำการแยกเชื้อให้บริสุทธิ์โดยสังเกตด้วยสายตาเลือกโคโลนีที่มีเส้นใยใต้อาหาร ผิวโคโลนีไม่เป็นมันเยิ้ม มีการสร้างสปอร์ แล้วใช้ไม้จิ้มฟันที่ปลอดเชื้อเขี่ยเชื้อขึ้นมานำไปเลี้ยงในอาหาร MS เพื่อเลี้ยงให้ได้เชื้อที่มีโคโลนีเดี่ยวๆ จากนั้นทำการเลี้ยงย่อยอีกครั้งหนึ่งโดยใช้ลูป (loop) แตะเชื้อโคโลนีเดี่ยวๆ ที่ได้เลี้ยงซ้ำในอาหาร MS เพื่อให้เชื้อแอคติโนมัยซีสที่ได้บริสุทธิ์อย่างแน่นอนก่อนที่จะทำการเก็บเชื้อไว้ใช้ต่อไป โดยขูดสปอร์ที่ได้ใส่ลงในสารละลายกลีเซอรอลเข้มข้น 20% เก็บที่อุณหภูมิ -20°องศาเซลเซียส

การทดสอบความสามารถการย่อยสลายปิโตรเลียม ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่น ในอาหารเลี้ยงเชื้อ

1 ทดสอบความสามารถในอาหารเหลวที่เตรียมจากน้ำกลั่น

นำเชื้อแอคติโนมัยซีสที่คัดแยกได้มาเลี้ยงในอาหาร NB เป็นเวลา 3-7 วัน วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร นำฟลาสก์ที่มีค่าดูดกลืนแสง ≥ 0.5 ไปใช้เป็นกล้าเชื้อ จากนั้นทำการถ่ายเชื้อที่ได้ 10% ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีอาหาร NB ที่เตรียมจากน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร และมีความเข้มข้นน้ำมันหล่อลื่น 0.5 และ 1.0% v/v เป็นแหล่งคาร์บอน (C) โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเชื้อแอคติโนมัยซีส ทำการทดลอง 3 ซ้ำ บ่มเชื้อเขย่าด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน

2 ทดสอบความสามารถในอาหารเหลวที่เตรียมจากน้ำทะเล

ทำการทำลองเช่นเดียวกับข้อ 1 แต่ทดลองกับน้ำทะเลแทนน้ำกลั่น

การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น

การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น โดยวิธีชั่งหาน้ำหนักน้ำมันหล่อลื่นที่หายไป (weight loss method) โดยสกัด Culture broth ด้วยไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) ในอัตราส่วน 1:1 ทำการสกัดซ้ำ 2 ครั้ง แล้วนำส่วนของตัวทำละลายมากำจัดน้ำด้วย Na_2SO_4 ทำแห้งตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ นำสารที่ได้ทิ้งให้แห้งในเดซิเคเตอร์ เพื่อกำจัดความชื้นและชั่งน้ำหนักสารที่ได้ จากนั้นคำนวณหาประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันจากน้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นที่หายไป (%WL) (Shirai *et al.,* 1995) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\%WL = (W1 - W2) / W1 \times 100$$

โดย W1 คือ น้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น

W2 คือ น้ำหนักของน้ำมันที่เหลือจากการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

การจัดจำแนกแอคติโนมัยซีสที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

หลังจากเลี้ยงแอคติโนมัยซีสบนอาหารแข็ง MS เป็นเวลา 3 วัน ก่อนมีการสร้างสปอร์จึงขูดเชื้อเพื่อนำมัยซิเลียมมาสกัดดีเอ็นเอตามวิธีของ Kieser *et al.* (2000) จากนั้นจึงทำการเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอส่วนของยีน 16S rRNA ด้วยปฏิกิริยาลูกโซ่โพลีเมอเรส (Polymerase Chain Reaction (PCR)) การเพิ่มปริมาณของยีนจะใช้คู่ไพรเมอร์ที่จำเพาะต่อบริเวณอนุรักษ์ของยีน 16S rRNA ของเชื้อแอคติโนมัยซีส คือ ไพรเมอร์ STR 1 F (5′-TCACGGAGAGTTTGATTCCTG-3′) และ STR 1530 R (5′-AAGGAGATCCAGCCGCA-3′) (Kataoka, 1997) โดยปฏิกิริยานี้ปรับสภาวะตามวิธีการของ Indananda *et al.* (2010)

นำดีเอ็นเอที่ได้จากการทำ PCR ไปทำให้บริสุทธิ์ โดยใช้ PCR Purification Kit แล้วจึงนำไปหาลำดับเบสโดยตรงด้วยไพรเมอร์ STR 1 F, STR 520 F และ STR 1530 R โดยเครื่องหาลำดับเบสอัตโนมัติ จากนั้นตรวจสอบผลแล้วจึงรวมลำดับเบสที่ได้จากทุกไพรเมอร์ เพื่อให้ได้ลำดับเบสของยีน 16S rRNA ที่สมบูรณ์โดยใช้โปรแกรม CAP3 (http://pbil.univ-lyon1.fr/cap3.php) และทำการบ่งชี้และจำแนกกลุ่มแอคติโนมัยซีสจากลำดับเบสของยีน 16S rRNA โดยการนำลำดับเบสที่ได้มาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์ใน Eztaxon ในเว็บไซต์ http://eztaxon-e.ezbiocloud.net/

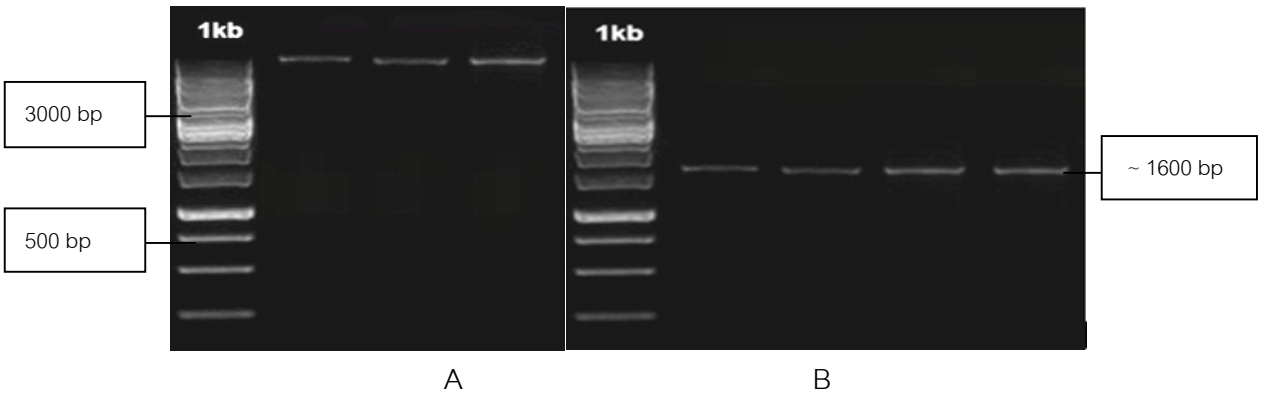


Figure 1 A The example of Genomics DNA testing results by using agarose gel electrophoresis technique.
B The example of PCR products testing results by using agarose gel electrophoresis technique.

ผลและวิจารณ์

ผลการคัดแยกเชื้อแอคติโนมัยซีสจากดินชายหาด

การคัดแยกจุลินทรีย์จากตัวอย่างดินชายหาด บริเวณชายหาดแม่รำพึง จังหวัดระยอง พบว่าสามารถคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ MS แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 28°C พบโคโลนีที่คาดว่าจะเป็นแอคติโนมัยซีสจำนวน 45 ไอโซเลต จากนั้นจึงทำการคัดแยกเชื้อให้บริสุทธิ์โดยเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ MS บ่มอาหารเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 1 สัปดาห์ พบว่าใน 45 ไอโซเลตข้างต้นเป็นแอคติโนมัยซีสเพียง 25 ไอโซเลต และให้รหัสประจำของแต่ละไอโซเลต คือ Mae Ramphueng beach, Rayong (MRBR) (Table 1) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khopade *et al*. (2012) ที่คัดแยก *Streptomyces* sp. B3 ที่มีความสามารถในการสร้างสารลดแรงตึงผิวของน้ำมันได้จากดินบริเวณชายฝั่งตะวันตกของอินเดีย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Coombs and Franco. (2003) ที่คัดแยกแอคติโนมัยซีสให้บริสุทธิ์บนอาหาร MS เพื่อให้ปรากฏลักษณะเด่นของแอคติโนมัยซีส

Table 1 Code number of isolated actinomycetes

Code	Isolate
MRBR	001, 002, 003, 004, 005, 006, 007, 008, 009, 010, 011, 012, 013, 014, 015, 016, 017, 018, 019, 020, 021, 022, 023, 024, 025

ผลการทดสอบความสามารถการย่อยสลายสารประกอบอะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่น ในอาหารเลี้ยงเชื้อ

เมื่อนำเชื้อแอคติโนมัยซีสที่คัดแยกได้ทั้ง 25 ไอโซเลตมาเลี้ยงในอาหาร NB ที่เติมน้ำมันหล่อลื่นเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่า มีแอคติโนมัยซีส 11 ไอโซเลต (Table 2) ที่มีประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมัน จากการสังเกตลักษณะของอาหารเหลวในฟลาสก์ที่มีการเติมแอคติโนมัยซีส เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเชื้อ พบว่าในฟลาสก์ที่มีการเติมแอคติโนมัยซีสจะมีลักษณะขุ่นทั้งฟลาสก์ไม่มีน้ำมันเกาะอยู่ที่ผิวหรือขอบฟลาสก์หรือมีในปริมาณที่น้อย แตกต่างจากชุดควบคุมที่มีน้ำมันลอยอยู่ที่ผิวหน้าและบริเวณขอบฟลาสก์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Katemai *et al*. (2008) ได้ทำการทดลองแยกยีสต์จากดินที่มีการปนเปื้อนน้ำมันบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย

Table 2 The 11 isolated growth actinomycetes in culture medium with carbon source from lubricant.

Code	Isolate
MRBR	001, 004, 005, 007, 008, 011, 012, 018, 019, 022, 025

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น

จากการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น โดยแอคติโนมัยซีสทั้ง 11 ไอโซเลตที่สามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เติมน้ำมันหล่อลื่นเป็นแหล่งคาร์บอนนั้น พบว่า อาหารเลี้ยงเชื้อ NB ที่เตรียมจากน้ำกลั่นแอคติโนมัยซีสไอโซเลต MRBR011, MRBR012, MRBR019 และ MRBR022 มีประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เฉลี่ยได้ในช่วง 46 - 63% (Table 3) โดยการหาน้ำหนักที่หายไปของน้ำมันหล่อลื่น ในอาหาร NB ที่ใส่น้ำมันหล่อลื่นที่ความเข้มข้น 0.5 และความเข้มข้น 1.0% v/v

Table 3 The weight loss percentage of lubricant (%WL) from the hydrocarbon biodegradation by 4 types of actinomycetes in 0.5 and 1.0% v/v lubricant with NB aqueous solution.

Isolate	%WL	
	in 0.5% v/v of lubricant	in 1% v/v of lubricant
MRBR011	63.33	55.70
MRBR012	53.07	51.28
MRBR019	49.37	46.79
MRBR022	54.12	48.72

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น โดยแอคติโนมัยซีสทั้ง 11 ไอโซเลตในอาหารเลี้ยงเชื้อ NB ที่เตรียมจากน้ำทะเล พบว่า มีเพียงแอคติโนมัยซีสไอโซเลต MRBR022 ที่มีประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นเฉลี่ยมากกว่า 50% คือ เท่ากับ 70.66 และ 56.75% ในอาหารเลี้ยงเชื้อ NB ที่มีความเข้มข้นน้ำมันหล่อลื่น 0.5 และ 1.0% v/v ตามลำดับ

ผลการจัดจำแนกแอคติโนมัยซีสที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่น

เมื่อนำลำดับนิวคลีโอไทด์ที่มีชิ้นยีนเกือบสมบูรณ์ของยีน 16S rRNA โดยมีขนาดตั้งแต่ 1222 – 1474 คู่เบส มาเปรียบเทียบความเหมือนกับข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์ของ EzTaxon ในเว็บไซต์ http://eztaxon-e.ezbiocloud.net/ พบว่าลำดับนิวคลีโอไทด์ดังกล่าวเหมือนกับลำดับนิวคลีโอไทด์ของทั้ง 11 ไอโซเลต เหมือนกับลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA ของแอคติโนมัยซีสสกุล *Streptomyces* (Table 4) โดยผลการคัดแยกสอดคล้องกับงานวิจัยของ Balachandran *et al.* (2012) ที่ศึกษาการย่อยสลายสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน โดยแอคติโนมัยซีสที่คัดแยกได้จากดินปนเปื้อนน้ำมันในประเทศอินเดีย ซึ่งผลการจัดจำแนกพบว่าเป็นแอคติโนมัยซีสสกุล *Streptomyces* sp.

Table 4 Comparison results of the similarity of nucleotide sequence on 16S rRNA gene.

Isolate	Strains	%similarity	Accession no.
MRBR011	*S. spiralis*	99.86	AB184575
MRBR012	*S. misionensis*	99.57	AB184285
MRBR019	*S. somaliensis*	99.93	AB184243
MRBR022	*S. misionensis*	99.44	AB184285

สรุป

จากการทดลองการคัดเลือกและจัดจำแนกแอคติโนแบคทีเรียที่มีความสามารถในการกำจัดสารประกอบอะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่น โดยทำการคัดแยกจากดินชายหาด บริเวณหาดแม่รำพึง จังหวัดระยอง พบว่าสามารถแยกเชื้อแอคติโนมัยซีสได้ 25 ไอโซเลต โดยแอคติโนมัยซีสไอโซเลต MRBR011 มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นเข้มข้น 0.5 และ 1.0% v/v ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมจากน้ำกลั่นคิดเป็นร้อยละ 63.33 และ 55.70 ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้วผลการทดลองยังพบว่าแอคติโนมัยซีสไอโซเลต MRBR022 มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นเข้มข้น 0.5 และ 1.0% v/v ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมจากน้ำทะเล คิดเป็นร้อยละ 70.66 และ 56.75 ตามลำดับ เมื่อจัดจำแนกด้วยยีน 16S rRNA พบว่าไอโซเลต MRBR011 มีค่าความเหมือนของลำดับนิวคลีโอไทด์กับ *Streptomyces spiralis* ร้อยละ 99.86 และ MRBR022 มีค่าความเหมือนของลำดับนิวคลีโอไทด์กับ *Streptomyces misionensis* ร้อยละ 99.44 แอคติโนมัยซีสทั้งสองไอโซเลตจึงจัดเป็นแอคติโนแบคทีเรียในสกุล (Genus) *Streptomyces* ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทางชีววิทยาเชิงโมเลกุล ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่ เครื่องมือ และสารเคมีในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

กรมเจ้าท่า. 2556. **สถิติน้ำมันรั่วไหล**. แหล่งที่มา: http://www.md.go.th/md/index.php/2014-01-19-05-02-28/2014-01-19-05-20-44/-oil-spill, 16 กรกฎาคม 2558.

วิชุดา เกตุใหม่. 2553. การคัดแยกจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว. **วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ** 12 (3): 202-213.

Balachandran, C., V. Duraipandiyan, K. Balakrishna and S. Ignacimuthu. 2012. Petroleum and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) degradation and naphthalene metabolism in *Streptomyces* sp.(ERI-CPDA-1) isolated from oil contaminated soil. **Bioresource technology**, 112: 83-90.

Coombs, J. T., and C. M. M. Franco. 2003. Isolation and identification of actinobacteria isolated from surface-sterilized wheat roots. **Applied and Environmental Microbiology** 69: 5603-5608.

Indananda, C., A. Matsumoto, Y. Inahashi, Y. Takahashi, K. Duangmal and A. Thamchaipenet. 2010. *Actinophytocola oryzae* gen. nov., sp. nov., isolated from the roots of Thai glutinous rice plants, a new member of the family *Pseudonocardiaceae*. **International journal of systematic and evolutionary microbiology**. 60 (5): 1141-1146.

Katemai, W., S. Maneerat, F. Kawai, H. Kanzaki, T. Nitoda and A. H-Kittikun. 2008. Purification and characterization of a biosurfactant produced by *Issatchenkia orientalis* SR4. **The Journal of General and Applied Microbiology**. 54: 79-82.

Kataoka, M. 1997. Application of the variaber region in 16S rDNA to create an index for rapid species identification in the genus *Streptomyces*. *Streptomyces* **FEMS Microbiology Letter**. 151: 249-255.

Khopade, A., B. Ren, X. Y. Liu, K. Mahadik, L. Zhang and C. Kokare. 2012. Production and characterization of biosurfactant from marine Streptomyces species B3. **Journal of colloid and interface science**, 367 (1): 311-318.

Kieser, T., M. J. Bibb, M. J. Buttner, K. F. Chater and D. A. Hopwood. 2000. Practical Streptomyces Genetics; The John Innes Foundation: Norwich, **UK: The John Innes Foundation** 613.

Mercade, M.E., L. Monleon, C. de Andees, I. Rodon, E. Martinez, M.J. Espuny and A. Manresa. 1996. Screening and selecting of surfactant-producing bacteria from waste lubricating oil. **Journal of Applied Bacteriology** 81: 161-166.

Shirai, K., N. Hanzawa and M. Katusta. 1995. Heavy oil degrading bacteria isolated by long term enrichment in alumina columns containing heavy oil C. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry** 59: 2159-2161.

พฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติ

Behaviors toward Wildlife of National Park Visitors

นภวรรณ ฐานะกาญจน์ พงษ์เขียว

Noppawan Tanakanjana Phongkhieo

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติ และบ่งชี้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือน เก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามกับผู้มาเยือนจำนวน 1,021 คน ในอุทยานแห่งชาติแก่งกระจาน เขาใหญ่ และเอราวัณ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา การวิเคราะห์ถดถอยพหุ และการวิเคราะห์จำแนกประเภท พบว่าผู้มาเยือนมีพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าค่อนไปทางบวก ทั้งพฤติกรรมขณะประกอบกิจกรรมในพื้นที่และพฤติกรรมในชีวิตประจำวัน ผลการวิเคราะห์ถดถอยพหุพบว่าค่านิยมเกี่ยวกับสัตว์ป่า ระดับการศึกษา และความรู้เกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ต่อสัตว์ป่ามีอิทธิพลต่อพฤติกรรมในพื้นที่ของผู้มาเยือน ผลการวิเคราะห์จำแนกประเภทพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าในชีวิตประจำวันพบปัจจัยที่มีอำนาจในการจำแนกสูงประกอบด้วย ระดับการศึกษา ค่านิยมเกี่ยวกับสัตว์ป่า ประสบการณ์ในการพบเห็นสัตว์ป่า ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ต่อสัตว์ป่า และถิ่นที่อาศัยในวัยเด็ก

ABSTRACT

The objectives of this research were to examine behaviors toward wildlife of national park visitors and to determine factors influencing the behaviors. Questionnaire was used to conduct visitor survey in Kaeng Krachan, Khao Yai and Erawan National Parks and 1,021 visitors completed the survey questionnaires. The survey data was analyzed by descriptive statistics, regression analysis and discriminant analysis. The results revealed that visitors' behaviors toward wildlife were moderately positive. Multiple regression analysis found wildlife value, education and knowledge about impact of human activities on wildlife significantly influenced visitors' on-site behaviors toward wildlife. Discriminant analysis found 5 factors with high standardized canonical discrimination function coefficients related to visitors' behaviors in everyday life. These included education, wildlife value, experience in encountering wildlife, knowledge about impact of human activities on wildlife and place of living in childhood.

Key Words: behavior toward wildlife, visitor, national parks

* Corresponding author; e-mail address: **ffornwt@ku.ac.th**

ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Conservation, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

อุทยานแห่งชาติเป็นพื้นที่คุ้มครองที่ถูกใช้ประโยชน์เข้มข้นโดยประชาชนหลากหลายกลุ่ม โดยเฉพาะผู้มาเยือนเพื่อประกอบกิจกรรมนันทนาการและการท่องเที่ยว ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาพบว่าจำนวนรวมของผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติเฉลี่ยสูงกว่า 10 ล้านคนต่อปี (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2555) ซึ่งสิ่งที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ก็คือผลกระทบทางลบจากกิจกรรมของผู้มาเยือนต่อระบบนิเวศของอุทยานแห่งชาติ รวมถึงผลกระทบ ต่อสัตว์ป่าที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ดังกล่าว งานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมนันทนาการของผู้มาเยือนต่อสัตว์ป่าในต่างประเทศ มีการดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องกว่า 2 ทศวรรษ โดย Hammitt and Cole (1987) และ Smith and Hellmund (1993) ให้ข้อสรุปเกี่ยวกับผลกระทบจากการประกอบกิจกรรมนันทนาการในพื้นที่ธรรมชาติต่อสัตว์ป่าไว้ 2 ลักษณะ คือ ผลกระทบทางตรงทั้งในลักษณะการใช้ประโยชน์แบบใช้แล้วหมดไป (consumptive use) เช่น การล่า การดักจับสัตว์ กับผลกระทบทางตรงจากการใช้ประโยชน์แบบใช้แล้วไม่หมดไป (non-consumptive use) เช่น การถ่ายภาพสัตว์ในระยะใกล้ และผลกระทบทางอ้อมที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนถิ่นที่อาศัยของสัตว์ป่า เช่น การหักเด็ดกิ่งไม้ การเหยียบย่ำ การเปิดพื้นที่เพื่อรองรับการประกอบกิจกรรมกางเต็นท์ เป็นต้น ซึ่งกิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ส่งผลต่อพฤติกรรม การกระจาย ความอยู่รอด และลักษณะทางสังคมของสัตว์ป่าทั้งสิ้น สอดคล้องกับ Knight and Cole (1995) และ Knight and Gutzwillller (1995) ที่ให้ข้อสรุปว่ากิจกรรมนันทนาการของผู้มาเยือนพื้นที่ธรรมชาติส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม ความแข็งแรง อัตราผลผลิต และการตายของสัตว์ป่า ซึ่งทั้งหมดส่งผลต่อเนื่องถึงองค์ประกอบของชนิดพันธุ์สัตว์ป่าในระบบนิเวศ ซึ่งถือว่าเป็นผลกระทบทางลบที่ค่อนข้างร้ายแรง สำหรับในประเทศไทย ผลงานวิจัยของพรชัย (2547) และนักสิทธิ์ (2549) ก็ยืนยันถึงผลกระทบจากกิจกรรมของผู้มาเยือนต่อสัตว์ป่าในอุทยานแห่งชาติ เช่นกัน ในการจัดการพื้นที่คุ้มครองซึ่งเป็นถิ่นที่อาศัยที่สำคัญของสัตว์ป่า นอกจากจะต้องมีการกำหนดพื้นที่เพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่างผู้ใช้ประโยชน์กับสัตว์ป่าแล้ว จึงยังจะต้องมีมาตรการควบคุมพฤติกรรมของผู้ใช้ประโยชน์ในรายละเอียด เพื่อลดผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสัตว์ป่า ซึ่งการจะควบคุมพฤติกรรมผู้ใช้ประโยชน์ให้ได้นั้นก็จำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยด้านพฤติกรรมของผู้มาเยือนต่อสัตว์ป่าในเชิงลึก งานวิจัยนี้จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติและบ่งชี้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือน โดยเลือกอุทยานแห่งชาติ 3 แห่งที่มีสัตว์ป่าออกมาปรากฏในบริเวณพื้นที่ประกอบกิจกรรมของผู้มาเยือน ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรมทางลบของผู้มาเยือนต่อสัตว์ป่า เช่น การให้อาหารสัตว์ป่า เป็นพื้นที่ศึกษา คือ อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ อุทยานแห่งชาติแก่งกระจาน และอุทยานแห่งชาติเอราวัณ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์หลักในการวิจัยครั้งนี้คือ แบบสอบถาม ประกอบด้วยข้อมูล 4 ตอน คือ ตอนที่ 1 ค่านิยมเกี่ยวกับสัตว์ป่า ตอนที่ 2 พฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่า ตอนที่ 3 ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ต่อสัตว์ป่า และตอนที่ 4 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผู้ตอบแบบสอบถาม

การศึกษาครั้งนี้กำหนดพื้นที่ศึกษาเป็นอุทยานแห่งชาติที่มีปริมาณการใช้ประโยชน์ด้านนันทนาการเข้มข้น ยืนยันจากสถิติผู้มาเยือนในรอบ 5 ปีที่ผ่านมาที่เฉลี่ยต่อปีสูงกว่า 1 แสนคน และเป็นอุทยานแห่งชาติที่มีสัตว์ป่าออกมาปรากฏในบริเวณพื้นที่ที่ผู้มาเยือนประกอบกิจกรรมนันทนาการ ซึ่งส่งผลต่อการปฏิสัมพันธ์ระหว่าง

ผู้มาเยือนกับสัตว์ป่า จากข้อพิจารณาที่ระบุข้างต้นทั้ง 2 ประการ ได้อุทยานแห่งชาติที่เป็นตัวแทนในการจัดเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 3 แห่ง คือ อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ อุทยานแห่งชาติเอราวัณ และอุทยานแห่งชาติแก่งกระจาน กำหนดให้ประชากรในการศึกษาเป็นผู้มาเยือนที่มีอายุตั้งแต่ 15 ปีขึ้นไป กำหนดขนาดตัวอย่างโดยใช้สถิติผู้มาเยือนเฉลี่ยรายปีของแต่ละพื้นที่เป็นฐานในการคำนวณโดยสูตรของทาโร ยามาเน่ (Yamane, 1973) กำหนดระดับความคลาดเคลื่อนในการสุ่มตัวอย่างไว้ที่ร้อยละ 5 ได้ขนาดตัวอย่างรวม 3 พื้นที่ 1,021 คน

การสร้างเครื่องมือเริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง สร้างนิยามปฏิบัติการของตัวแปรที่เกี่ยวข้องทุกตัวแปร สร้างคำถาม จัดลำดับคำถาม และนำไปทดสอบก่อนการใช้เก็บข้อมูลจริงกับผู้มาเยือนในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ จำนวน 40 ชุด จากนั้นนำมาทำการปรับปรุงภาษาที่ใช้บางส่วน คำนวณหาค่าความยาก (difficulty) และความเชื่อมั่นโดยวิธีการของคูเดอร์-ริชาร์ดสัน (Kuder-Richardson) สำหรับคำถามวัดความรู้ได้ค่า 0.71 และ 0.57ตามลำดับ และทดสอบความเชื่อมั่นโดยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์อัลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha) สำหรับคำถามวัดค่านิยมด้านต่างๆ ได้ค่าความเชื่อมั่นที่ 0.73 จากนั้นทำการปรับปรุงเครื่องมือครั้งสุดท้ายตามผลการทดสอบคุณภาพ แล้วนำเครื่องมือที่ได้ไปใช้ในการเก็บข้อมูลโดยวิธีการให้ผู้มาเยือนกรอกแบบสอบถามด้วยตนเอง (self-administered questionnaire) กระจายตัวอย่างครอบคลุมทุกพื้นที่ประกอบกิจกรรมของผู้มาเยือน สลับกลุ่มเว้นกลุ่ม กลุ่มขนาดเล็กที่มีสมาชิกกลุ่มไม่เกิน 5 คน เก็บข้อมูลจากตัวแทนกลุ่ม 1 คน กลุ่มขนาดใหญ่ที่มีสมาชิกกลุ่มตั้งแต่ 6 คนขึ้นไป เก็บข้อมูลจากตัวแทนกลุ่มจำนวน 2 คน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาตรวจสอบความสมบูรณ์ ลงรหัสข้อมูล (coding) และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา การวิเคราะห์ถดถอยพหุ (multiple regression analysis) และการวิเคราะห์จำแนกประเภท (discriminant analysis)

ผลและวิจารณ์

ลักษณะพื้นฐานทางสังคมประชากร

ผู้มาเยือนส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 55.04 โดยส่วนใหญ่มีอายุระหว่าง 26-30 ปี คิดเป็นร้อยละ 19.71 มีอายุเฉลี่ย 33.04 ปี (SD = 9.67) ด้านระดับการศึกษา ส่วนใหญ่มีการศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรี คิดเป็นร้อยละ 61.61 รองลงมาคือ ระดับการศึกษาสูงกว่าปริญญาตรี คิดเป็นร้อยละ 12.63 ส่วนใหญ่มีอาชีพเป็นพนักงานบริษัทเอกชน คิดเป็นร้อยละ 40.55 รองลงมาคือ รับราชการ คิดเป็น ร้อยละ 15.57 ผู้มาเยือนส่วนใหญ่มีรายได้ต่อเดือนระหว่าง 15,001-20,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 20.68 โดยมีรายได้เฉลี่ยเท่ากับ 27,720.05 (SD = 24,336.91) ผู้มาเยือนส่วนใหญ่มีภูมิลำเนาเดิมหรือถิ่นที่อาศัยในวัยเด็กเป็นชุมชนเมือง คิดเป็นร้อยละ 49.56 รองลงมาคือ เป็นชุมชนชนบทนอกเขตเทศบาลที่แวดล้อมด้วยพื้นที่เกษตรกรรม คิดเป็นร้อยละ 30.07 โดยภาพรวมจึงอาจสรุปได้ว่าผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติส่วนใหญ่มีภูมิหลังที่เกี่ยวข้องกับธรรมชาติ ซึ่งหมายรวมถึงโอกาสในการปฏิสัมพันธ์กับสัตว์ป่าในพื้นที่ธรรมชาติอยู่ในระดับต่ำ

พฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาพฤติกรรมของผู้มาเยือนที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่า ผู้วิจัยแยกพฤติกรรมออกเป็น 2 ส่วน คือ พฤติกรรมขณะประกอบกิจกรรมอยู่ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ และพฤติกรรมในชีวิตประจำวัน ผลการศึกษาในส่วนของพฤติกรรมขณะประกอบกิจกรรมอยู่ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ พบว่า พฤติกรรมเชิงบวกที่ผู้มาเยือนปฏิบัติสูงสุด คือ "เมื่อพบเห็นสัตว์ป่าจะดูอยู่ห่างๆ และไม่ส่งเสียงดังรบกวน"คิดเป็นร้อยละ 98.43 รองลงมา คือ "ถ้าพบ

เห็นสัตว์ป่ากำลังข้ามถนน จะหยุดรอให้สัตว์ผ่านไปก่อน เพื่อไม่ให้สัตว์ตกใจ" คิดเป็นร้อยละ 98.14 ส่วนพฤติกรรมเชิงลบ ที่ผู้มาเยือนปฏิบัติสูงสุด ได้แก่ "ให้อาหารปลาบริเวณน้ำตก/แหล่งน้ำในเขตอุทยานแห่งชาติเพื่อจะได้ดูปลาที่มากินอาหารจำนวนมาก" คิดเป็นร้อยละ 20.47 รองลงมา คือ "แตะต้องตัวสัตว์ด้วยความเมตตาเอ็นดู" คิดเป็นร้อยละ 16.45 โดยพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าโดยภาพรวมเป็นพฤติกรรมที่ค่อนไปทางบวกด้วยค่าเฉลี่ย 13.39 (จากจำนวนรวม 15 พฤติกรรม) (SD =1.97) ค่าร้อยละของการปฏิบัติเป็นรายข้อปรากฏตาม Table 1

Table 1 Percentage distribution of on-site park visitors' behaviors toward wildlife

Behavior	Do	Do not
1. Watch wildlife in a far distance peacefully.	98.43	1.57
2. Buy a souvenir made from wildlife part.	7.54	92.46
3. Wait for wildlife while they are crossing the road in order not to frighten them.	98.14	1.86
4. Feed the wildlife so as to be close to them.	14.89	85.11
5. Enter strict nature reserve zone of the park to view wildlife.	11.36	88.64
6. Feed the fish with the intention of seeing mass of them.	20.47	79.53
7. Spotlight the wildlife without permission.	12.14	87.86
8. Try to be close to wildlife as possible to see their movement.	9.21	90.79
9. Shout/roar to expel wildlife from visitor activity area.	12.34	87.66
10. Walk along the nature trail peacefully so that wildlife present.	75.12	24.88
11. Turn on the sound stripe to attract wildlife.	7.84	92.16
12. Raise loud noise pleasingly when encountering unseen wildlife.	10.77	89.23
13. Touch wildlife body lovingly.	16.45	82.55
14. Walk off-trail to watch wildlife closely.	4.90	95.10
15. Use bait to appeal wildlife.	4.31	95.69

ในส่วนของพฤติกรรมในชีวิตประจำวันพบว่าพฤติกรรมเชิงบวกที่ผู้มาเยือนปฏิบัติในบางครั้งสูงสุด คือ การศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสัตว์ป่าจากสื่อต่างๆ ในยามว่าง คิดเป็นร้อยละ 68.76 รองลงมา คือ การเข้าร่วมกิจกรรมอนุรักษ์สัตว์ป่า เช่น ร่วมสร้างโป่งเทียม ปลูกพืชอาหารสัตว์ ร่วมบริจาคเพื่อการอนุรักษ์ เป็นต้น คิดเป็นร้อยละ 65.92 ในส่วนของพฤติกรรมเชิงลบที่ผู้มาเยือนปฏิบัติในบางครั้งสูงสุด คือ การรับประทานอาหารที่ปรุงจากสัตว์ป่า คิดเป็นร้อยละ 33.50 รองลงมา คือ การซื้อสินค้าที่เป็นผลผลิตจากสัตว์ คิดเป็นร้อยละ 18.51 รายละเอียดปรากฏใน Table 2

Table 2 Percentage distribution of behaviors toward wildlife in everyday life of park visitors

Behavior	Engagement		
	Never	Some time	Often time
1. Eat food made from wild animal	65.92	33.50	0.59
2. Injure wild animal found in residential area	82.76	17.04	0.20
3. Possess wildlife	96.08	3.23	0.69
4. Purchase good made from wildlife or its parts	81.10	18.51	0.39
5. Participate in wildlife conservation activities	27.62	65.92	6.46
6. Engage in wildlife-based recreation activities	44.17	50.44	5.39
7. Study about wildlife from media during leisure time	17.04	68.76	14.20

ในส่วนของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยด้านการศึกษา ถิ่นที่อาศัยในวัยเด็ก ประสบการณ์ในการพบเห็นสัตว์ป่า ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ต่อสัตว์ป่า และค่านิยมเกี่ยวกับสัตว์ป่า ซึ่งในส่วนของระดับการศึกษาและถิ่นที่อาศัยในวัยเด็กได้กล่าวถึงมาแล้วในส่วนของลักษณะพื้นฐานทางสังคมประชากรของผู้มาเยือน สำหรับประสบการณ์ในการพบเห็นสัตว์ป่า พบว่าในรอบปีที่ผ่านมา ผู้มาเยือนส่วนใหญ่เคยพบเห็นสัตว์ป่าจำนวน 1-3 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 53.05 รองลงมาคือ ไม่เคยพบเห็นสัตว์ป่า คิดเป็นร้อยละ 27.63 โดยมาค่าเฉลี่ยของการพบเห็นสัตว์ป่าเท่ากับ 2.42 ครั้ง (SD = 3.09) ในส่วนของความรู้เกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ต่อสัตว์ป่าพบว่า ผู้มาเยือนมีความรู้เฉลี่ยอยู่ในระดับสูง ด้วยค่าคะแนนเฉลี่ย 6.81 (SD=1.80) จากคะแนนเต็ม 10 คะแนน สำหรับค่านิยมเกี่ยวกับสัตว์ป่า งานวิจัยนี้แยกวัดค่านิยมออกเป็น 8 ด้าน พบว่า ผู้มาเยือนมีค่านิยมเกี่ยวกับสัตว์ป่าด้านสิ่งแวดล้อม ด้วยค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ 4.49 (SD=0.58) รองลงมา คือ ค่านิยมด้านคุณธรรมและความเชื่อทางศาสนา ด้วยค่าเฉลี่ย 4.33 (SD=0.76) และค่านิยมด้านการอยู่ร่วมกันแบบเกื้อหนุนด้วย ค่าเฉลี่ย 4.04 (SD=0.67) โดยค่านิยมทั้ง 3 ด้านดังกล่าวเป็นค่านิยมที่ผู้มาเยือนยึดถือในระดับสูง ในขณะที่ค่านิยมด้านอื่นๆ ได้แก่ ด้านการใช้ประโยชน์สัตว์ป่า ด้านความรักผูกพันกับสัตว์ป่า ด้านความน่าสนใจ/ดึงดูดใจของสัตว์ป่า ด้านความน่ารังเกียจของสัตว์ป่า และด้านความปลอดภัยของมนุษย์ จะอยู่ในระดับปานกลางและต่ำ ทั้งนี้โดยภาพรวมผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติมีระดับค่านิยมเกี่ยวกับสัตว์ป่าอยู่ในระดับปานกลาง ด้วยค่าเฉลี่ย 3.46 (SD = 0.32)

ผลการทดสอบสมมติฐาน

การวิจัยครั้งนี้กำหนดสมมติฐานไว้ว่า "*การศึกษา ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ต่อสัตว์ป่า ประสบการณ์ในการพบเห็นสัตว์ป่า ถิ่นที่อาศัยในวัยเด็ก และค่านิยมเกี่ยวกับสัตว์ป่า ส่งผลต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือน*" โดยแยกวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน คือ ผลต่อพฤติกรรมของผู้มาเยือนขณะประกอบกิจกรรมในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ กับ ผลต่อพฤติกรรมในชีวิตประจำวัน

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุระหว่างตัวแปรอิสระตามสมมติฐานกับตัวแปรตามพฤติกรรมขณะประกอบกิจกรรมภายในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ พบว่า ตัวแปรอิสระทุกตัวรวมกันส่งผลต่อพฤติกรรมของผู้มาเยือนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือนในระดับปาน

กลาง และก่อให้เกิดความแปรผันในพฤติกรรมประมาณร้อยละ 18.2 (F=32.248; p-value=.000; Multiple R=.427; R^2 =.182) เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว พบว่าความรู้เกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ต่อสัตว์ป่ามีอิทธิพลต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือนสูงสุด (Beta =.251; p-value = .000) โดยผู้ที่มีความรู้มากจะมีพฤติกรรมเชิงบวกต่อสัตว์ป่ามาก รองลงมาคือ ค่านิยมด้านการใช้ประโยชน์สัตว์ป่า (Beta = -.144; p-value = .000) และค่านิยมด้านความน่าสนใจ/ดึงดูดใจของสัตว์ป่า (Beta = .114; p-value = .000) โดยผู้ที่มีค่านิยมด้านการใช้ประโยชน์สัตว์ป่ามากจะมีพฤติกรรมเชิงบวกต่อสัตว์ป่าน้อย และผู้ที่มีค่านิยมด้านความน่าสนใจ/ดึงดูดใจของสัตว์ป่ามากจะมีพฤติกรรมเชิงบวกกับสัตว์ป่ามาก ดังรายละเอียดใน Table 3 ทั้งนี้มีตัวแปรตามสมมติฐาน 2 ตัวที่ไม่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือนขณะประกอบกิจกรรมในอุทยานแห่งชาติ คือ ประสบการณ์ในการพบเห็นสัตว์ป่า และถิ่นที่อาศัยในวัยเด็ก

Table 3 Results from multiple regression analysis testing the influence of independent variables on park visitors' on-site behaviors toward wildlife

Independent variables	B	Std.Error	Beta	t	p-value
Education	.096	.044	.064	2.208	.027
Knowledge about impact of human activities on wildlife	.275	.033	.251	8.220	.000
Materialism value toward wildlife	-.380	.081	-.144	-4.723	.000
Mutualism value toward wildlife	.258	.100	.088	2.569	.010
Caring value toward wildlife	-.256	.101	-.087	-2.533	.011
Attraction value toward wildlife	.284	.077	.114	3.708	.000
Environmentalism value toward wildlife	.296	.104	.087	2.847	.004

Remarks: F=32.284; p-value=.000; Multiple R=.427; R^2 =.182

สำหรับผลของตัวแปรอิสระตามสมมติฐานต่อตัวแปรตามพฤติกรรมในชีวิตประจำวันของผู้มาเยือนซึ่งผู้วิจัยทำการแยกวิเคราะห์เป็นรายพฤติกรรม รวม 7 พฤติกรรม คือ การรับประทานอาหารที่ปรุงจากสัตว์ป่า การทำร้ายสัตว์ป่าที่พบในบริเวณบ้านหรือสถานที่อื่นๆ การนำสัตว์ป่ามาเลี้ยง การซื้อสินค้าที่เป็นผลผลิตจากสัตว์ การเข้าร่วมกิจกรรมการอนุรักษ์สัตว์ป่า การประกอบกิจกรรมดูนก/สัตว์ป่าเพื่อนันทนาการ และการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสัตว์ป่าจากสื่อต่างๆ ในยามว่าง โดยในแต่ละพฤติกรรมจะแยกผู้มาเยือนออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ผู้ที่กระทำและไม่กระทำพฤติกรรมแต่ละอย่าง จากนั้นนำตัวแปรอิสระทุกตัวตามสมมติฐานมาวิเคราะห์ผลต่อการจำแนกตัวแปรตามโดยวิธีการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่ม (discriminant analysis) ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการรับประทานอาหารที่ปรุงจากสัตว์ป่า แต่สำหรับพฤติกรรมอื่นอีก 6 พฤติกรรม มีตัวแปรอิสระบางตัวที่มีผลต่อพฤติกรรมซึ่งในที่นี้พิจารณาจากค่าอำนาจในการจำแนกที่สูงกว่า 0.40 (ค่า standardized canonical discriminant function coefficient สูงกว่า 0.40) ได้ผลการวิเคราะห์ดังปรากฏตาม Table 4

Table 4 Results from discriminant analysis revealing the influence of each independent variable on visitors' behavior in everyday life

Dependent variable (behavior in everyday life)	Standardized Canonical Discriminant Function Coefficients ≥ .400							Canonical Correlation
	1	2	3	4	5	6	7	(p<.05)
Injure wild animal found in residential area	.698	-	-	-	.416	-	-	.173
Possess wildlife	-	.795	.476	-	-	-	.503	.181
Purchase good made from wildlife or its parts	.587	-	-	.402	-	-	-	.176
Participate in wildlife conservation activities	-	-	-	-	.402	-	-	.232
Engage in wildlife-based recreation activities	-	.606	-	-	-	-	-	.177
Study about wildlife from media during leisure time	-	-	-	-	.424	.526	-	.260

Remarks: 1=education 2=Experience in encountering wildlife
3=knowledge about impact of human activities on wildlife
4=materialism value toward wildlife 5=caring value toward wildlife
6=attraction value toward wildlife 7=place of living in childhood

ผลการวิเคราะห์ในส่วนของปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมในชีวิตประจำวันของผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติ พบว่าค่อนข้างสอดคล้องกับผลต่อพฤติกรรมที่ผู้มาเยือนปฏิบัติขณะประกอบกิจกรรมอยู่ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ ปัจจัยด้านระดับการศึกษาและความรู้ยังคงมีอิทธิพลต่อการกระทำพฤติกรรม โดยเพิ่มปัจจัยด้านประสบการณ์ในการพบเห็นสัตว์ป่าและถิ่นที่อาศัยในวัยเด็กเข้ามาร่วมด้วย ในขณะที่ปัจจัยด้านค่านิยม ยังคงพบว่าค่านิยมด้านการใช้ประโยชน์สัตว์ป่า ด้านความรักและความผูกพันต่อสัตว์ป่า และด้านความน่าสนใจของสัตว์ป่า เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของผู้มาเยือน ในขณะที่ค่านิยมต่อสัตว์ป่าด้านอื่นๆ ไม่มีอิทธิพล โดยผลการศึกษาในส่วนของปัจจัยด้านค่านิยมสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Tanakanjana and Saranet (2007) ในขณะที่ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือนได้ผลที่ค่อนข้างสอดคล้องกับผลงานวิจัยของนวลนุช (2550)

สรุป

ผลการวิจัยโดยภาพรวมสรุปได้ว่าผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติ มีพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าค่อนไปทางบวก ทั้งพฤติกรรมขณะประกอบกิจกรรมในพื้นที่อุทยานและพฤติกรรมในชีวิตประจำวัน ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อการอนุรักษ์ทรัพยากรสัตว์ป่าทั้งในพื้นที่คุ้มครองและนอกพื้นที่คุ้มครอง โดยพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ

พฤติกรรมได้แก่ ระดับการศึกษา ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ต่อสัตว์ป่า ประสบการณ์ในการพบเห็นสัตว์ป่า สภาพถิ่นที่อาศัยในวัยเด็ก และค่านิยมด้านต่าง ๆ ต่อสัตว์ป่าซึ่งเป็นผลมาจากการปลูกฝัง กล่อมเกลาที่แต่ละปัจเจกบุคคลได้รับ ในการจัดการผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติเพื่อลดผลกระทบต่อสัตว์ป่า นักจัดการจึงควรให้ความสำคัญกับความรู้เกี่ยวกับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ต่อสัตว์ป่าที่ควรส่งผ่านโปรแกรมสื่อความหมายไปยังผู้มาเยือนในระดับที่เข้มข้น อย่างต่อเนื่อง ส่วนการส่งอิทธิพลต่อพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าในชีวิตประจำวัน ควรสอดแทรกความรู้เข้าไปในระบบการศึกษาในทุกระดับ เพื่อให้ประชาชนในสังคมมีความเข้าใจ และตระหนักถึงความสำคัญของสัตว์ป่าต่อระบบนิเวศทางธรรมชาติ และการอยู่ร่วมกันแบบเกื้อหนุนระหว่างคนกับสัตว์ป่าในทุกสถานการณ์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2555. **สถิตินักท่องเที่ยวในอุทยานแห่งชาติ**. แหล่งที่มา: http://www.dnp.go.th/NPRD/develop/data/stat55. 18 มีนาคม 2555.

นักสิทธิ์ สังข์จันทร์. 2549. **ผลกระทบจากกิจกรรมนันทนาการต่อพฤติกรรมและการใช้พื้นที่ของกวางป่าในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นวลนุช เขียวหวาน. 2550. **ค่านิยมและพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ป่าของผู้มาเยือนอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรชัย กัณห์อุไร. 2547. **ผลกระทบจากการให้อาหารสัตว์ป่าในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่: กรณีศึกษาลิงกัง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Hammitt, W. E. and D. N. Cole. 1987. **Wildland Recreation: Ecology and Management**. John Wiley & Son, New York.

Knight, R. L. and D. N. Cole. 1995. Wildlife Responses to Recreationists, pp. 51-69. *in* Knight, R. L. and K. J. Gutzwiller. **Wildlife and Recreationists**. Island Press, Washington, D.C.

Knight, R. L. and K. J. Gutzwiller. 1995. **Wildlife and Recreationists**. Island Press, Washington, D.C.

Smith, D. S. and P. C. Hellmund. 1993. **Ecology of Greenways; Design and Function of Linear Conservation Areas.** University of Minnesota Press, Minneapolis.

Tanakanjana, N. and Saranet, S. 2007. Wildlife value orientations in Thailand: preliminary findings. **Human Dimension of Wildlife**, 12:339-345.

Yamane, T. 1973. **Statistic: Introduction Analysis**. 3rd ed., Harper International Edition, Tokyo.

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

Subject: Natural Resources and Environment

ภาคโปสเตอร์

Poster Presentation

การบำบัดสีในน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

Decolorization of Synthetic Dyeing Wastewater by Catalytic Ozonation

ธัญวรรณ กฤษณะพุกต์ * และ ชลอ จารุสุทธิรักษ์

Thanyawan Kritsanapuk * and Chalor Jarusutthirak

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้กระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสี Reactive Red 2 เป็นองค์ประกอบ จากการศึกษาพบว่าก๊าซโอโซนสามารถกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีย้อม 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้อย่างรวดเร็ว ภายในช่วงเวลา 5 นาทีแรก สามารถกำจัดสีได้ถึง 99%, 90% และ 80% ตามลำดับ จากการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสีย้อมพบว่าที่ค่าพีเอช 11 สามารถทำให้การกำจัดสีย้อมมีประสิทธิภาพมากที่สุด จากการทดลองการใช้กระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนิกเกิล (Ni) ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดสีได้ถึง 99% ภายในเวลา 5 นาที ในขณะที่โอโซนอย่างเดียวกำจัดได้ภายในเวลา 9 นาที จากการศึกษาลักษณะการเกิดปฏิกิริยาทั้งการใช้โอโซนและการใช้โอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (k) มีค่าเท่ากับ 0.4813 และ 0.9849 นาที $^{-1}$ ตามลำดับ

ABSTRACT

This research aimed to study decolorization of synthetic dyeing wastewater containing Reactive Red 2 (RR2) by catalytic ozonation process. The results showed that ozone was able to rapidly reduce color intensity of synthetic wastewater at initial dye concentrations of 100, 250 and 500 mg/L. Within 5 minutes, ozone exhibited removal efficiencies of 99%, 90%, and 80%, respectively. The effect of pH on decolorization was investigated. It was found that an increase of pH 11 provided higher efficiency in removal of RR2. At initial dye concentration of 250 mg/L, The catalytic ozonation process using nickel (Ni(II)) as a catalyst, exhibited removal efficiency of 99% within 5 minutes, whereas ozonation alone exhibited removal efficiency of 99% within 9 minutes. The reaction kinetics of ozonation and catalytic ozonation with RR2 reactive dye followed the first-order kinetic reaction. The reaction rate constants (k) during ozonation and catalytic ozonation were 0.4813 and 0.9849 min^{-1}, respectively.

Key Words: catalytic ozonation, decolorization, reactive dye, synthetic wastewater

* Corresponding author; e-mail address: **snowhime_som@hotmail.com**

ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นขั้นตอนที่ทำการเปลี่ยนวัสดุสิ่งทอที่อยู่ในรูปเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จรูป ที่สามารถนำไปผลิตหรือจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไปได้ ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เกิดจากการใช้น้ำ สารเคมีและสีย้อมในปริมาณมาก ลักษณะน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะมีสีเข้ม อุณหภูมิสูง ค่าของแข็งละลายน้ำและของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง ค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีสูง (ขนิษฐา, 2555) เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ สีของน้ำเสียและอนุภาคคอลลอยด์สามารถบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำ ลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำนั้น ปัจจุบันมีเทคโนโลยีในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมหลายวิธี ได้แก่การบำบัดทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ซึ่งการบำบัดทางชีวภาพจะมีราคาถูกกว่าวิธีการบำบัดอื่น แต่วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ต่ำเนื่องจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีความเป็นพิษ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีทางกายภาพ เช่น การดูดซับ การตกตะกอนและเยื่อกรองเมมเบรน วิธีการเหล่านี้เป็นการย้ายมลสารจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ไม่ได้มีการทำลายโครงสร้างสี (Wu *et al*., 2008) กระบวนการออกซิเดชันทางเคมีเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม เนื่องจากมีศักยภาพทำลายโครงสร้างสีย้อมที่สูง ซึ่งก็มีอยู่หลายวิธีได้แก่ การใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) การใช้แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV) และ กระบวนการโอโซเนชัน (Ozonation) เป็นต้น (วนิดา, 2555)

กระบวนการโอโซเนชันเป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายโครงสร้างของสีในน้ำเสียและใช้เวลาในการบำบัดได้เร็วกว่าวิธีการอื่น (Tomiyaso *et al*., 1985) การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโอโซเนชันสามารเกิดขึ้นผ่านกลไก 2 ชนิด ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนโดยตรง (Direct ozonation) และการเกิดปฏิกิริยาผ่านแรดิคอล (Radical type mechanism) ข้อจำกัดของการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซโอโซนโดยตรง คือการจำเพาะเจาะจง (Selectivity) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างช้า ในขณะที่กลไกการเกิดแรดิคอล ได้แก่ ไฮดรอกซิลแรดิคอล (Hydroxyl radical, OH°) สามารถลดข้อจำกัดนี้ได้ โดยพบว่าไฮดรอกซิลแรดิคอล มีค่ากำลังออกซิไดซ์ (Oxidizing power) สูงกว่าก๊าซโอโซนและการเกิดปฏิกิริยาไม่จำเพาะเจาะจง สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากได้ (Refractory organic compounds) ข้อจำกัดของการใช้กระบวนการโอโซเนชันคือมีค่าใช้จ่ายสูงในการเดินระบบ การติดตั้ง และการผลิตก๊าซโอโซน ดังนั้นการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ร่วมกับกระบวนการโอโซเนชันเป็นอีกหนึ่งวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดระยะเวลาในการเดินระบบ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสูงขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโอโซนในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม Reactive Red 2 (RR2) ด้วยการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ร่วมกับกระบวนการโอโซเนชัน จากการศึกษาของอาทิตย์ และคณะ (2551) พบว่าทองแดง (Cu(II)) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมคองโกเรดได้ดีที่สุด รองลงมาคือนิกเกิล (Ni(II)) แต่เนื่องจากทองแดงมีความเป็นพิษต่อร่างกาย ในขณะที่นิกเกิลมีความเป็นพิษต่อร่างกายในเกณฑ์ต่ำหรือจัดว่าไม่เป็นพิษ (ชัยวัฒน์, 2552) ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพ สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี และมีความเป็นพิษต่อ

ร่างกายต่ำ ทำการเปรียบเทียบกับการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ค่าพีเอชของน้ำเสีย ผลจากการวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวทางในการใช้กระบวนการโอโซเนชันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

สารละลายสีย้อมและตัวเร่งปฏิกิริยา

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อม โดยในการทดลองนี้ใช้สีย้อม Reactive Red 2 (RR2) มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 615 และสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $C_{19}H_{10}Cl_2N_6Na_2O_7S_2$ (Figure 1) สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยวิธี UV-Visible Spectrophotometry ที่ 514 nm ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์คือ Ni(II) เตรียมจาก $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$

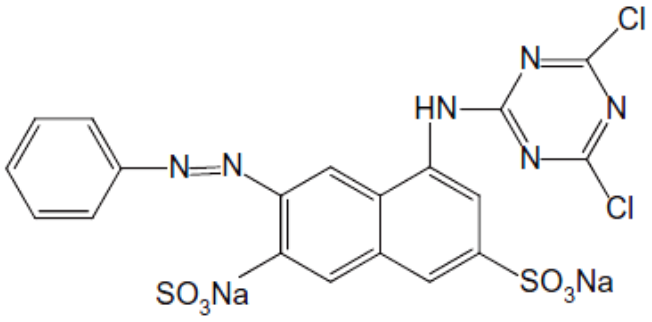


Figure 1 The molecular structure of RR2 dye.

การติดตั้งและเดินระบบโอโซเนชัน

ถังปฏิกิริยาทำจากอะคริลิค มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 95 เซนติเมตร ปริมาตรของถัง 3,650 ลูกบาศก์เซนติเมตร การติดตั้งถังปฏิกิริยาทำโดยการให้ก๊าซโอโซนเข้าทางด้านบนของระบบ ผ่านหัวกระจายก๊าซ (Gas Diffuser) ซึ่งอยู่ด้านล่างของตัวถัง จากนั้นทำการเปิดเครื่องผลิตโอโซเนชัน นำอากาศอัดเข้าสู่เครื่องผลิตโอโซนโดยมีเครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ (Flow meter) ควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 5 ลิตรต่อนาที ก๊าซโอโซนที่ได้จะเข้าผ่านหัวกระจายก๊าซทำให้ก๊าซมีลักษณะเป็นฟองช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับน้ำตัวอย่าง และปริมาณก๊าซโอโซนที่เหลือออกจากระบบถูกดักจับด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (KI 2%) ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

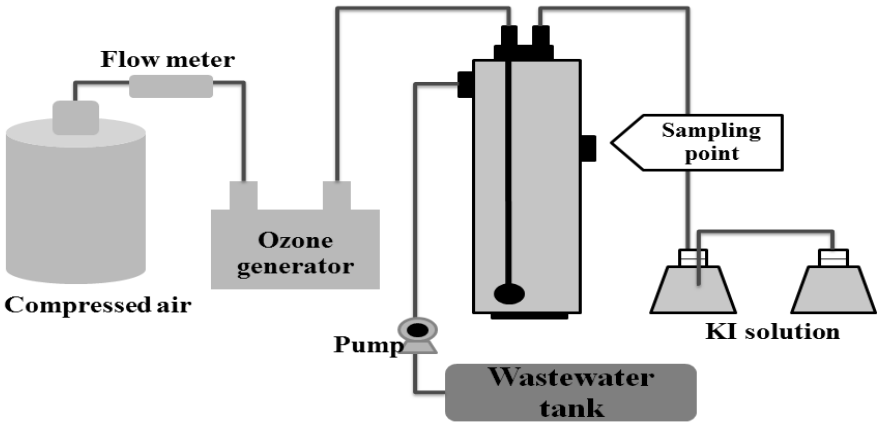


Figure 2 Schematic diagram of the experimental setup.

การศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมต่อการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซเนชัน

เตรียมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ RR2 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2 ลิตร ใส่ในถังปฏิกิริยา (Figure 2) ทำการเปิดเครื่องผลิตก๊าซโอโซนและทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 นาที จนครบ 12 นาที นำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วย UV-visible ที่ความยาวคลื่น 514 nm จากนั้นนำผลที่ได้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสีย้อมเทียบกับเวลา ทำการทดลองอีกครั้งโดยเปลี่ยนความเข้มข้นสีย้อมเป็น 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อเปรียบเทียบการกำจัดสีและหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซเนชัน

เตรียมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ RR2 ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2 ลิตร ใส่ในถังปฏิกิริยา ทำการปรับค่าพีเอชน้ำตัวอย่างเป็น 3 โดยใช้กรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับค่าพีเอช และทำการวัดด้วย pH meter ทำการเปิดเครื่องผลิตก๊าซโอโซน เก็บตัวอย่างทุกๆ 1 นาที จนครบ 12 นาที นำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วย UV-visible ที่ความยาวคลื่น 514 nm ทำการทดลองอีกครั้งโดยเปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 5 7 9 และ 11 เพื่อเปรียบเทียบการกำจัดสี

การกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

เตรียมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ RR2 ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2 ลิตร ใส่ในถังปฏิกิริยา ทำการชั่ง $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 4.95 กรัม ใส่ลงในน้ำตัวอย่าง คิดเป็นความเข้มข้น Ni เท่ากับ 1 กรัมต่อลิตรนิกเกิล ทำการเปิดเครื่องผลิตโอโซน เก็บตัวอย่างทุกๆ 1 นาที จนครบ 12 นาที นำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วย UV-visible ที่ความยาวคลื่น 514 nm เมื่อทำการทดลองเสร็จทำการแยกโลหะหนัก Ni ออกจากสารละลาย โดยการปรับค่าพีเอชของสารละลายให้มีค่าประมาณ 10 ซึ่งเป็นค่าที่ Ni(II) สามารถตกตะกอนได้ดีที่สุด จากนั้นทำการแยกตะกอน Ni(II) ออกก่อนนำน้ำส่วนใสทิ้งสู่แหล่งน้ำต่อไป

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของความเข้มข้นสีย้อมต่อการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซเนชัน

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพการลดลงของสีย้อม ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อม RR2 ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (Figure 3) จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นสีย้อม RR2 ที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถกำจัดสีย้อมได้ 99% ที่เวลา 5 นาที และที่ความเข้มข้น 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการกำจัดสีย้อม 9 นาที และ 14 นาที ตามลำดับ การลดลงของสีย้อมเกิดจากการทำลายพันธะของหมู่โครโมฟอร์ในสีย้อม โดยในช่วง 5 นาทีแรกของการเกิดปฏิกิริยาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น เกิดจากปริมาณหมู่โครโมฟอร์ที่มากขึ้นตามความเข้มข้นของสีย้อม ในขณะที่อัตราการผลิตก๊าซโอโซนคงที่ แต่เมื่อช่วงเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งประสิทธิภาพการกำจัดสีจะมีค่าใกล้เคียงกัน

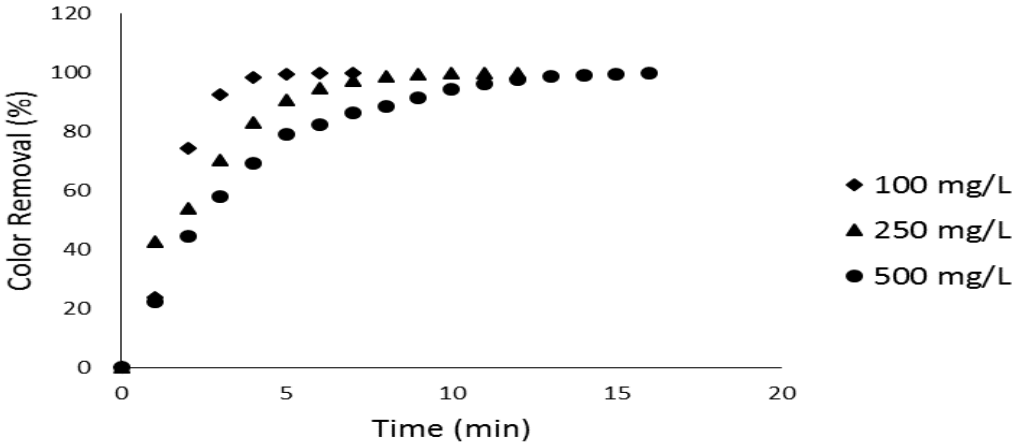


Figure 3 Effect of different initial dyes on color removal (initial pH = 6.9).

ผลของค่าพีเอชต่อการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซเนชัน

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อม RR2 ที่มีความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร (Figure 4) พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม โดยพบว่าที่พีเอช 11 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้สูงที่สุด สามารถกำจัดสีย้อมได้ 99 % เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ในขณะที่พีเอช 3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ต่ำที่สุด สามารถกำจัดสีย้อมได้ 99 % เมื่อเวลาผ่านไป 9 นาที เมื่อพีเอชสูงขึ้นจะมีค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Parsa and Negahdar. (2012) และ Turhan *et al*. (2012) เนื่องจากที่สภาวะเบส ก๊าซโอโซนจะสลายตัวให้ไฮดรอกซิลแรดดิคอล (OH°) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีและรวดเร็วกว่าก๊าซโอโซน สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารได้หลายประเภท และมีความไม่เฉพาะเจาะจงจึงสามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมได้ดีกว่าที่สภาวะกรด ซึ่งก๊าซโอโซนจะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์สารโดยตรง อาจจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม RR2 คือหมู่เอโซได้ยากกว่ากว่า เนื่องจากก๊าซโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารที่มีตำแหน่งเฉพาะเจาะจงหรือหมู่ฟังก์ชันที่ก๊าซโอโซนสามารถออกซิไดซ์ได้

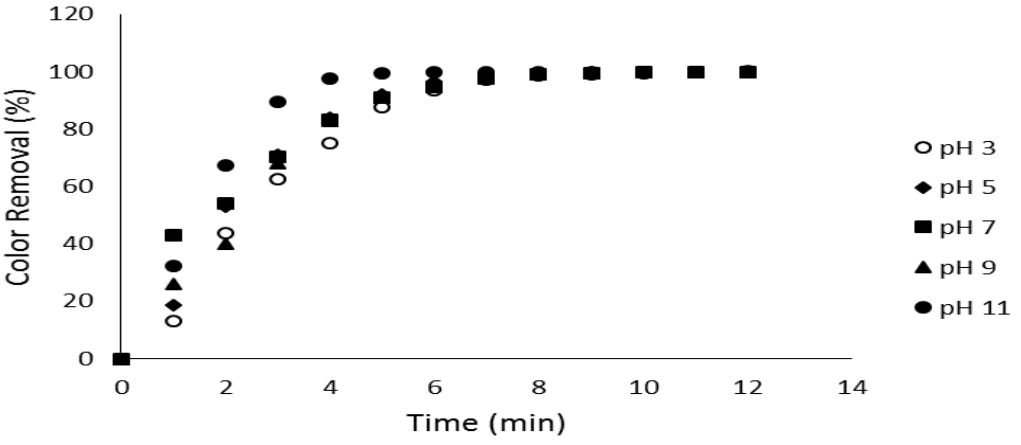


Figure 4 Effect of pH on color removal (RR2 = 250 mg/L and initial pH = 6.9).

การกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาผลของการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม RR2 ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองคือ Ni(II) ความเข้มข้น Ni เท่ากับ 1 กรัมต่อลิตรนิกเกิล ทำการเปรียบเทียบระหว่างการกำจัดสีย้อมด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวและการกำจัดสีย้อมร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่พีเอชเริ่มต้น (Figure 5) พบว่าการกำจัดสีย้อมด้วยโอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(II) สามารถกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุด โดยสามารถกำจัดสีย้อมได้ 99% เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ในขณะที่เมื่อใช้กระบวนโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว สามารถกำจัดสีย้อมได้ 99% เมื่อเวลาผ่านไป 9 นาที เนื่องจาก Ni(II) เป็นโลหะทรานซิชันจึงสามารถเร่งปฏิกิริยาที่เกิดกับกระบวนการโอโซเนชันได้ โดย Ni(II) ทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนและแตกตัวให้ไฮดรอกซิลแรดดิคอล ($OH^{\cdot}$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีและรวดเร็วกว่าก๊าซโอโซน ทำให้สามารถกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว (Nawrocki, 2013)

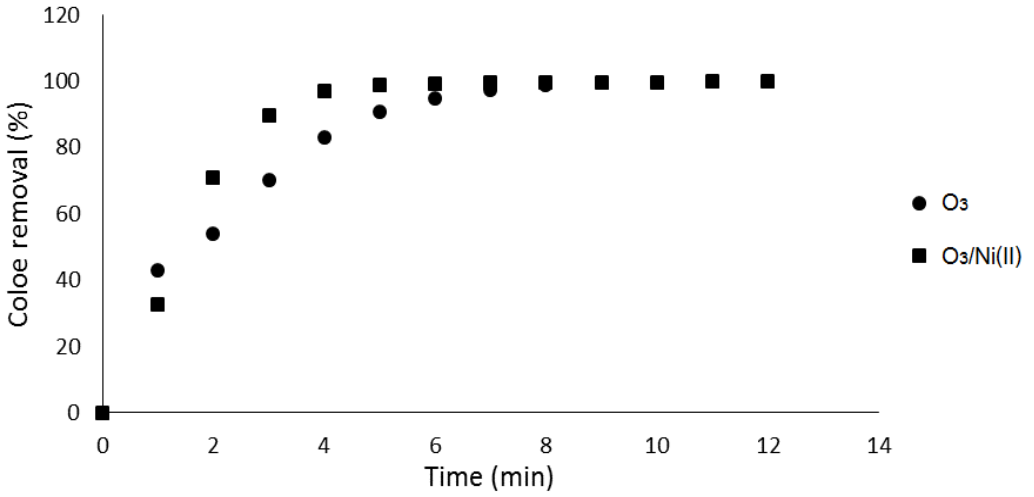


Figure 5 Effect of Ni as a catalyst on color removal (RR2 = 250 mg/L, [Ni^{2+}] = 1 g/L, initial pH = 6.4).

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซโอโซนและสีย้อมในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซเนชัน โดยศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมที่ระยะเวลาต่างๆ ของการเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น RR2 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าลักษณะการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซโอโซนและสีย้อม RR2 เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และมีค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (k) ตามที่แสดง (Table 1)

Table 1 Reaction rate constant on color removal

pH	Type of reaction	k (min^{-1})	R^2
3	First-order	0.4644	0.9676
5	First-order	0.5638	0.9775
7	First-order	0.4813	0.9866
9	First-order	0.5283	0.9696
11	First-order	1.0100	0.9763

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซโอโซนและสีย้อมในการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโอโซเนชันและกระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(II) โดยศึกษาค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่ลดลงตามระยะเวลาต่างๆ ของการเกิดปฏิกิริยา จากการศึกษาลักษณะการเกิดปฏิกิริยาทั้งการใช้โอโซนและการใช้โอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นที่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (k) มีค่าเท่ากับ 0.4813 และ 0.9849 นาที $^{-1}$ ตามลำดับ (Figure 6) แสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Ni(II) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่ากระบวนการโอโซเนชันเพียงอย่างเดียว

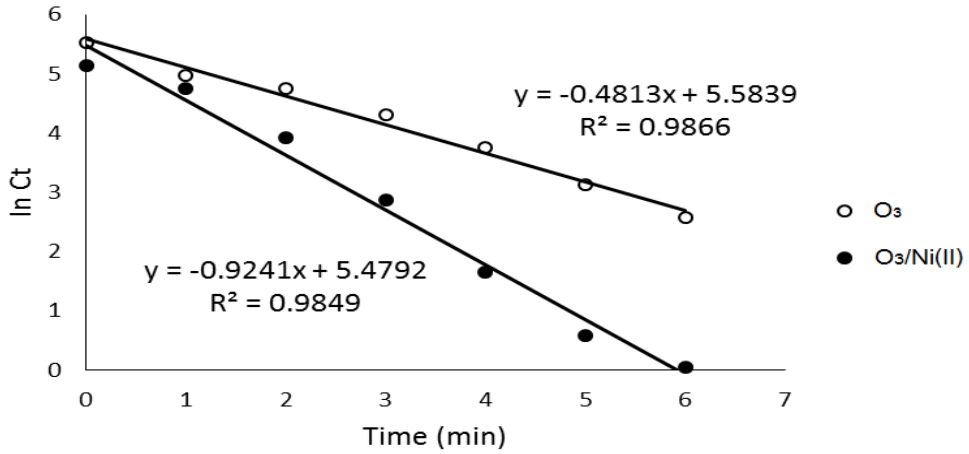


Figure 6 Reaction rate constant on color removal (RR2 = 250 mg/L, [Ni^{2+}] = 1 g/L, initial pH = 6.4).

สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพการใช้กระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสี Reactive Red 2 พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมต่ำลง ค่าพีเอชที่ใช้ในการกำจัดสีย้อมมากขึ้น (สภาวะเบส) จะทำให้กำจัดสีย้อมได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด จากการทดลองการใช้กระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว จากการศึกษาลักษณะการเกิดปฏิกิริยาพบว่าเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และค่าคงที่อัตราเร็วของการ

เกิดปฏิกิริยา (k) ของการใช้กระบวนการโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนงานวิจัยและใช้ห้องปฏิบัติการเป็นสถานที่ปฏิบัติการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ขนิษฐา สุวรรณรัตน์. 2550. **สีย้อมในอุตสาหกรรมฟอกย้อม**. แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true, 16 กันยายน 2557.

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2552. **Nickel (Ni)**. แหล่งที่มา: https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/ topic2 / Ni.html, 8 ธันวาคม 2558.

วนิดา ชูอักษร. 2555. เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา** 17: 181-191.

อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์, ถิรจิตรา ทาปลัด และ สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์. 2551. การบำบัดสีคองโกเรดด้วยวิธีโอโซเนชันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา, น.161-162. ใน **การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่7**. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์, กรุงเทพ.

Nawrocki, J. 2013. Catalytic ozonation in water: Controversies and questions: Discussion paper. **Applied Catalysis B: Environmental** 142–143: 465–471.

Parsa, J.B. and S.H. Negahdar. 2012. Treatment of wastewater containing Acid Blue 92 dye by advanced ozone-based oxidation methods. **Separation and Purification Technology** 98:315–320.

Tomiyaso, H., H. Fukutomi and G. Gordon. 1985. Kinetics and mechanisms of ozone decomposition in basic aqueous solution. **Inorganic Chemistry** 24: 2962-2985.

Turhan, K., L. Durukan, S.A. Ozturkcan and Z. Turgut. 2012. Decolorization of textile basic dye in aqueous solution by ozone. **Dyes and Pigments** 92: 897-901.

Wu, C., C. Kuo and C. Chang. 2008. Homogeneous catalytic ozonation of C.I. Reactive Red 2 by metallic ions in a bubble column reactor. **Journal of Hazardous Materials** 154: 748–755.

การผลิตเอทานอลจากเศษอาหารด้วยเชื้อผสมของ *Bacillus subtilis* และ *Saccharomyces cerevisiae*

Ethanol production from food waste by co-culture of *Bacillus subtilis* and *Saccharomyces cerevisiae*

พัชรา ต๊ะชาย[1] อนวัช พินิจศักดิ์กุล[2] พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์[1] และ สุคนธ์ ตันติไพบูลย์วุฒิ[1*]

Patchara Tachai[1], Anawat Pinitsakul[2], Punchira Wongsawasdi[1] and Sukon Tantipaibulvut[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเอทานอลจากเศษอาหาร โดยใช้ *Bacillus subtilis* TISTR 025 ร่วมกับ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5160 เริ่มจากการศึกษาการเจริญของเชื้อเดี่ยว *B. subtilis* ในเศษอาหาร 50 กรัม แปรผันปริมาณเศษอาหารต่อน้ำ และอุณหภูมิในการบ่ม พบว่า เศษอาหาร 50 กรัม อัตราส่วนต่อน้ำ 1:2 บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 73.83 ± 0.36 มิลลิกรัมต่อกรัมเศษอาหารแห้ง และเมื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลของเชื้อผสม โดยการแปรผันเวลาการใส่กล้ายีสต์ (เพาะเลี้ยงแบคทีเรียพร้อมยีสต์ (B+S) และเพาะเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 1 (b1D) และ 2 (b2D) วัน พร้อมทั้งแปรผันสภาวะปลอดเชื้อ (S) และไม่ปลอดเชื้อก่อนเติมยีสต์) บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่า การใส่ยีสต์หลังการเลี้ยงแบคทีเรีย 1 วัน โดยไม่ฆ่าแบคทีเรียก่อน (b1D) ให้ความเข้มข้นเอทานอลสูงสุด 508.73 ± 21.71 มิลลิกรัมเอทานอลต่อกรัมเศษอาหารแห้ง ดังนั้น การใช้เศษอาหาร 50 กรัม อัตราส่วนต่อน้ำ 1:2 โดยเพาะเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 1 วัน ไม่ฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีสต์ บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่เหมาะในการผลิตเอทานอลจากเศษอาหาร

ABSTRACT

This research studied about the production of ethanol from food waste using the co-culture of *Bacillus subtilis* TISTR 025 and *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5160. The research began with the study of the growth of single culture *Bacillus subtilis* with 50 g food waste by varying the ratio of food waste to water and incubation temperature. It was found that the optimum condition for the growth of the *Bacillus* was 50 g of food waste ratio 1:2 to water, incubated at 37 ºC. The yield of reducing sugar was 73.83 ± 0.36 mg /g dry food waste. For ethanol production of co-cultures, the optimum condition was investigated by varying the inoculation time of *S. cerevisiae* (simultaneous fermentation (B+S) and inoculation of bacillus 1 (b1D) or 2 (b2D) days before yeast and sterilized (S) or non-sterilized food waste before yeast inoculation), incubated at 37 ºC. It appeared that the optimum condition for ethanol production was the addition of *B. subtilis* 1 day before *S. cerevisiae* without bacillus sterilization before yeast inoculation (b1D). The ethanol yield was 508.73 ± 21.71 mg per g dry food waste of fermentation. Therefore, the selection of 50 g of food waste ratio 1:2 to water and incubation of bacillus 1 day before yeast without bacillus sterilization before yeast inoculation was the optimum condition for the ethanol production.

Key Words: Food waste, *Bacillus subtilis*, *Saccharomyces cerevisiae,* Ethanol

* Corresponding author; e-mail address: **sukon.tan@mail.kmutt.ac.th**

[1]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Department of Microbiology, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

[2]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

คำนำ

ปัจจุบันโลกประสบปัญหาขาดแคลนพลังงานและราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดลงและไม่สามารถสร้างขึ้นทดแทนได้ เนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นภาคอุตสาหกรรม ภาคการขนส่ง ภาคการท่องเที่ยวและการบริการ ซึ่งส่งผลต่อการบริโภคที่มากขึ้น ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่ประสบปัญหาทั้งการนำเข้าน้ำมันและปัญหาขยะล้นเมือง (ธัญญ์พิชชา และคณะ, 2557) การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวล จึงเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังลดลง(Shanavas *et al*., 2011; Xue *et al*., 2012) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพส่วนใหญ่มาจากวัสดุทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด และถั่วเหลือง ซึ่งในประเทศไทยนิยมใช้โมแลสจากอ้อยและมันสำปะหลังในการผลิตไบโอเอทานอล (Silalertruksa and Gheewala, 2010) ค่าใช้จ่าย 50 เปอร์เซ็นต์ของการผลิตเอทานอลขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต (Pokhrel *et al*., 2008) ดังนั้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเอทานอล วัตถุดิบที่ราคาถูก เช่น วัสดุเหลือทิ้งจากธัญพืช (Kim and Dale, 2004; Lal, 2008) ขยะมูลฝอยจากเทศบาลและอุตสาหกรรม (Stichnothe and Azapagic, 2009) ขยะเศษอาหาร (Han *et al*., 2006) จึงถูกนำมาใช้ผลิตเอทานอล ในปี 2557 ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนทั่วประเทศมีประมาณ 26.19 ล้านตัน หรือ 71,778 ตันต่อวัน โดยเป็นขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในกรุงเทพมหานครประมาณ 3.94 ล้านตัน (ร้อยละ 15) และเกิดขึ้นในจังหวัดอื่นๆ รวมประมาณ 22.25 ล้านตัน (ร้อยละ 85) มีการนำขยะมูลฝอยประมาณ 4.8 ล้านตัน กลับมาใช้ประโยชน์ หรือร้อยละ 18.32 ของปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น การเรียกคืนบรรจุภัณฑ์โดยผู้ประกอบการรวม 3.63 ล้าน (ร้อยละ 76) ที่เหลือเป็นการนำมูลฝอยอินทรีย์มาหมักทำปุ๋ยอินทรีย์ปุ๋ยชีวภาพ และการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) ประมาณ 1.07 ล้านตัน (ร้อยละ 22) และการนำมูลฝอยมาผลิตพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงทดแทน ประมาณ 0.10 ล้านตัน (ร้อยละ 2) (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2558) จากปัญหาขยะประเทศไทย พบว่าร้อยละ 64 คือขยะอาหารที่ปนเปื้อนและตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม (สำนักวิชาการ สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา, 2557) องค์ประกอบของขยะเศษอาหารส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต 60 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 20 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 10 เปอร์เซ็นต์ (Sayeki *et al*., 2011) ด้วยองค์ประกอบเหล่านี้ส่งผลให้ขยะเศษอาหารสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพต่างๆ (Lin *et al*., 2013) แทนการฝังกลบหรือเป็นอาหารสัตว์

จากความต้องการในการพัฒนาแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ ส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล เพื่อใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในรูปแบบของแก๊สโซฮอล์ของประเทศไทยขยายตัวอย่างมาก หากมีการส่งเสริมให้มีการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากเศษอาหารโดยใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลด้วยการหมัก จะเป็นการเพิ่มคุณค่าให้แก่เศษอาหาร โดยเปลี่ยนแปลงให้เป็นสารเคมีราคาสูง และเป็นวิธีที่ช่วยลดปริมาณขยะได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาการหมักเอทานอลจากอาหารเหลือทิ้งของโรงอาหารมหาวิทยาลัยด้วยเชื้อผสม เพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายที่สูงของการใช้เอนไซม์ทางค้าในการย่อยสลายเศษอาหาร โดยขั้นแรกศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อเดี่ยว *Bacillus subtilis* แปรผันปริมาณเศษอาหารต่อน้ำและอุณหภูมิในการบ่ม เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลริดิวซ์ให้เยอะที่สุดของแบคทีเรียจากเศษอาหาร และศึกษาการผลิตเอทานอลของเชื้อผสมระหว่างแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* โดยแปรผันระยะเวลาการเติมเชื้อยีสต์ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอลได้มากที่สุด

อุปกรณ์และวิธีการ

แหล่งของเศษอาหาร

เศษอาหารที่ใช้ในการทดลองนำมาจากโรงอาหารมหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บริเวณที่รองรับเศษอาหาร ในช่วงเวลา 12.30-13.30 น. โดยเก็บตัวอย่างตั้งแต่ เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2557 ถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 จำนวน 2 ครั้งต่อเดือน ทำการคัดแยกของแข็ง เช่น กระดูก ก้างปลา เปลือกหอย เป็นต้น ออกจากเศษอาหาร คัดแยกเอาเฉพาะข้าวเป็นส่วนใหญ่ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเศษอาหารที่ใช้ในการศึกษาดัง Table 1

Table 1 Characteristics of food waste used in experiment

Parameters	Content[a]
pH	4.86 ± 1.32
Moisture (%)	75.35 ± 3.03
Volatile total solid (base on dry weight) (%)	95.52 ± 1.08
Total carbon (base on dry weight) (%)	53.35 ± 0.75
Ash (base on dry weight) (%)	4.08 ± 1.37
Total nitrogen (base on dry weight) (%)	14.02 ± 2.25
C:N ratio	4.93 ± 1.32
Fat (base on dry weight) (%)	2.62 ± 2.98

Note : [a]Content is percent weight by weight, except C:N ratio

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

แบคทีเรีย *Bacillus subtilis* TISTR 025 และยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5160 จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย คลองห้า ปทุมธานี ซึ่งเชื้อทั้งสองชนิดจะถูกเก็บใน Nutrient Agar (NA) slant และ Yeast-Malt (YM) slant ตามลำดับ ทำการต่อเชื้อ (sub-culture) ทุกเดือน

การศึกษาปริมาณน้ำต่อเศษอาหารและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ของ *Bacillus subtilis*

นำเศษอาหาร 50 กรัมที่ผ่านการคัดแยกของแข็งออกใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการแปรผันปริมาณน้ำที่เติมในเศษอาหาร โดยใช้น้ำ 100 150 และ 200 มิลลิลิตร ตามลำดับ (อัตราส่วนเศษอาหารต่อน้ำ 1:2 1:3 และ 1:4 ตามลำดับ) นำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา15 นาที นำกล้าเชื้อ *B. subtilis* ที่มีความขุ่นของเชื้อที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร เท่ากับ 0.8 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ข้างต้น ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ทำการเก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

เมื่อได้ปริมาณน้ำต่อเศษอาหารที่เหมาะสม ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการบ่มต่อการผลิตน้ำตาลของแบคทีเรีย โดยใช้จำนวนเศษอาหาร และปริมาณกล้าเชื้อดังที่กล่าวมาแล้ว นำขวดเศษอาหารใส่ในตู้บ่มอุณหภูมิ 28 37 และ 45 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

การศึกษาการเพาะ *B. subtilis* พร้อม *S. cerevisiae* และเพาะแบคทีเรียก่อนยีสต์ 1 และ 2 วัน พร้อมทั้งแปรผันสภาวะปลอดเชื้อก่อนเติมเชื้อยีสต์

นำเศษอาหาร 50 กรัมต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสมจากการทดลองขั้นต้น ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แบ่งตัวอย่างออกเป็น 5 ชุด เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการใส่ยีสต์ต่อการผลิตเอทานอล ชุดที่ 1 เพาะเลี้ยงแบคทีเรียพร้อมยีสต์ ชุดที่ 2 เพาะเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 1 วัน โดยไม่ฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีสต์ ชุดที่ 3 เพาะเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 1 วัน โดยฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีสต์ ชุดที่ 4 เพาะเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 2 วัน โดยไม่ฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีสต์ ชุดที่ 5 เพาะเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 2 วัน โดยฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีสต์ ใช้กล้าเชื้อ *B. subtilis* และ *S. cerevisiae* ที่มีความขุ่นที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร เท่ากับ 0.8 ใส่ลงในแต่ละชุดการทดลอง อัตราส่วน 10:10 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการหมัก เก็บตัวอย่างทุกวันที่ 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณเอทานอล

การวิเคราะห์

เศษอาหารที่เก็บมาจะทำการวิเคราะห์ความเป็นกรดด่าง (pH) ความชื้น (Moisture content) ของแข็งที่ระเหยได้ (Volatile solid) ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total carbon) ปริมาณเถ้า (Ash) (APHA, 1995) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) ด้วยวิธี Kjeldahl method (APHA, 1995) ปริมาณไขมัน (Lipid concentration) ด้วยวิธี Soxhlet method (Nielsen, 2002) ปริมาณเอทานอลที่ได้จากการหมัก วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง FID Gas Chromatograph (AutoSystem XL, PerkinElmer instruments, USA) ตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี 3,5-dinitrosalicylic acid method (Miller, 1959) ทุกการทดลองทำซ้ำ 2 ครั้ง

ผลและวิจารณ์

อิทธิพลของปริมาณน้ำต่อเศษอาหารและอุณหภูมิต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ของ *Bacillus subtilis*

จากการทดลองแปรผันปริมาณน้ำต่อปริมาณเศษอาหาร พบว่า เศษอาหารจำนวน 50 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร อัตราส่วน 1:2 บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าการเติมน้ำที่ 150 และ 200 มิลลิลิตร (63.18±1.70, 46.98±0.77 และ 26.92±0.14 มิลลิกรัมต่อกรัมเศษอาหารแห้งตามลำดับ, Figure 1 (left)) โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะเพิ่มสูงในวันที่ 2 ของการบ่ม และเพิ่มสูงสุดวันที่ 7 ของการบ่ม ดังนั้น ในการทดลองต่อไปจะใช้เศษอาหาร จำนวน 50 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร

ทั้งนี้อาจเนื่องจากความชื้นหรือปริมาณน้ำที่มากเกินไป ขัดขวางการเจริญของเชื้อที่ใช้ในการผลิต ทำให้ลดผลได้ของเอนไซม์ ขัดขวางการถ่ายโอนความร้อนและแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างอากาศกับเศษอาหาร ดังนั้น ลดการถ่ายโอนออกซิเจน (Pérez-Guerra *et al*., 2003)

เมื่อได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสม จึงทำการแปรผันอุณหภูมิในการบ่ม (28 37 และ 45 องศาเซลเซียส) พบว่าการเลี้ยงแบคทีเรียในเศษอาหารที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด (73.83±0.36 มิลลิกรัมต่อกรัมเศษอาหารแห้ง, Figure 1 (right)) อาจเนื่องจากอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์แอลฟ่า-อะไมเลส ที่ *B. subtilis* สร้างขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Yang *et al*. (2014) ที่กล่าวว่า อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเปลี่ยนสภาพแป้งให้เป็นน้ำตาล (saccharification) ของของเสียจากบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ด้วยเอนไซม์แอลฟ่า-อะไมเลส (α-amylase)

และกลูโคอะไมเลส (glucoamylase) แต่ถ้าอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำกว่านี้ (45 และ 28 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) ปริมาณน้ำตาลที่ได้จะลดลง (54.93±0.6 และ 38.68±0.29 มิลลิกรัมต่อกรัมเศษอาหารแห้ง ตามลำดับ)

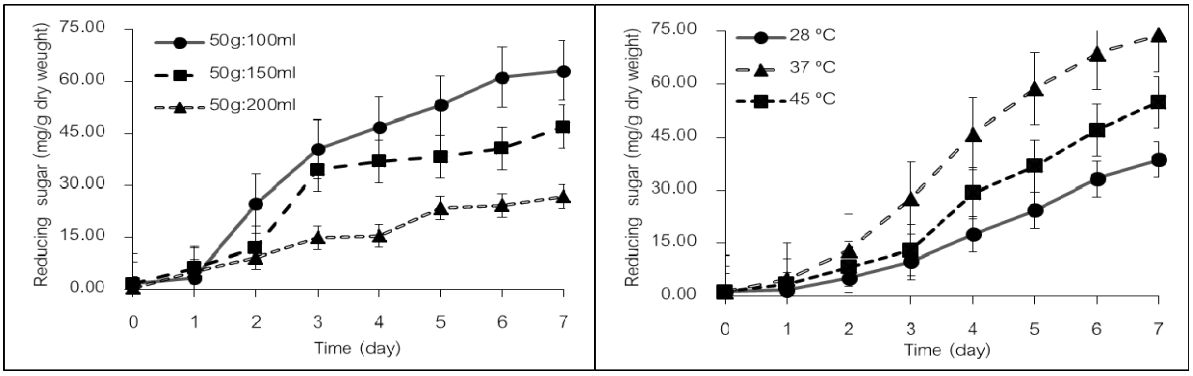


Figure1 Effect of different water content (left) and incubation temperature (right) on reducing sugar produced by *B. subtilis*

ลำดับของการเพาะ *S. cerevisiae* และสภาวะปลอดเชื้อก่อนเติมเชื้อยีสต์ต่อปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้

ในการศึกษาการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียพร้อมยีสต์ (B+S) เป็นการหมักแบบ simultaneous saccharification and fermentation (การย่อยสลายวัตถุดิบควบคู่กับการหมักในถังเดียว, SSF) ส่วนเพาะเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 1 (b1D) และ 2 (b2D) วัน โดยแปรผันสภาวะปลอดเชื้อและไม่ปลอดเชื้อก่อนเติมเชื้อยีสต์ (sterilized (S) and non-sterilized) เป็นการหมักแบบ separate hydrolysis and fermentation (การย่อยสลายวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก, SHF) พบว่า b1D ซึ่งเป็นการเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 1 วัน โดยไม่ฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีสต์ ให้ผลผลิตเอทานอลสูงสุด มีปริมาณเอทานอล 508.73 ± 21.71 มิลลิกรัมเอทานอลต่อกรัมเศษอาหารแห้ง (Figure 2A) เมื่อบ่มเชื้อผสมเป็นเวลา 15 วัน เปรียบเทียบกับ b2D การเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 2 วัน โดยไม่ฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีสต์ ที่มีปริมาณเอทานอล 353.86 ± 25.86 มิลลิกรัมเอทานอลต่อกรัมเศษอาหารแห้ง ในวันที่ 15 เช่นกัน ให้ผลผลิตเอทานอลสูงเป็นอันดับสอง รองลงมาเป็น B+S, b2DS และ b1DS (224.89±0.07, 142.98±7.78 และ 98.84±1.10 มิลลิกรัมเอทานอลต่อกรัมเศษอาหารแห้ง ตามลำดับ) ปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการหมัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Kim *et al*. (2011) รายงานว่า การหมักแบบ SHF ให้ผลผลิตเอทานอลดีกว่าการหมักแบบ SSF (เทียบกับ Figure 2A) หลายงานวิจัยทำการเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการหมักทั้งสองแบบ Kadar *et al*. (2004) พบว่าการหมัก Solka Floc (ผงเซลลูโลสบริสุทธิ์) และกระดาษลูกฟูกเก่า ด้วยวิธี SSF ให้ผลผลิตเอทานอล 0.337 และ 0.312 กรัม เอทานอลต่อกรัมเซลลูโลส ตามลำดับ ในขณะที่ Jeihanipour and Taherzadeh (2008) รายงานว่า ของเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่หมักด้วยวิธี SHF ให้ผลผลิตเอทานอล 0.48 กรัมเอทานอลต่อกรัมของเสีย แสดงให้เห็นว่าการหมักแบบ SHF ให้ผลผลิตเอทานอลที่ดีกว่าการหมักแบบ SSF ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ใน b1D, b2D และ B+S มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและสูงสุดในวันที่ 9 และเริ่มลดลงต่ำสุดวันที่ 15 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากแบคเรียและยีสต์ใช้ในการเจริญเติบโตและผลิตเอทานอล ส่วน b1DS และ b2DS พบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์น้อยกว่า 35 มิลลิกรัมต่อกรัมเศษอาหารแห้ง (Figure 2B) ส่งผลต่อการผลิตเอทานอล จาก Figure 2B กรณีที่ความเข้มข้นน้ำตาลสูงเกินขีดจำกัดประมาณร้อยละ 22 โดยน้ำหนักต่อปริมาณสารละลาย จะเกิดการรบกวนการเจริญเติบโตของยีสต์ (reactant inhibition) ทำให้ยีสต์เติบโตได้ยาก การหมักจะเป็นไปอย่างเชื่องช้าและไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดกรดแลกติก กรดน้ำส้มและสารอินทรีย์ต่างๆขึ้นได้ (สาวิตรี,

2549) ซึ่งในการศึกษา B+S b1D และ b2D จะให้ผลผลิตของกรดแลกติกที่เกิดจากการหมัก (Sakai *et al*., 2003; Tao *et al*., 2005; Wang *et al*., 2005) ทำให้ส่งผลต่อผลผลิตเอทานอลที่เกิดขึ้น แม้ว่าจะพบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่สูง

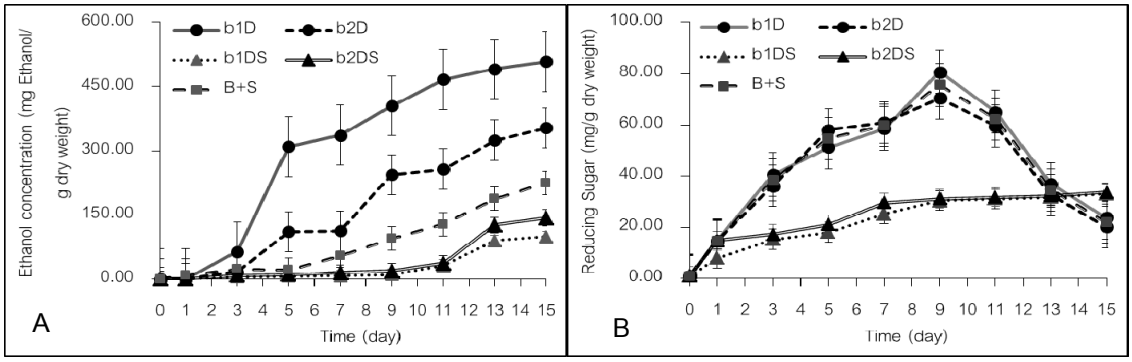


Figure 2 Ethanol production (A) and reducing sugar (B) during simultaneous saccharification and fermentation (B+S) compared with separate hydrolysis and fermentation under non-sterilized and sterilized bacteria: (b1D) addition of bacteria 1 day before yeast, (b2D) addition of bacteria 2 day before yeast, (b1DS) addition of bacteria 1 day before yeast; sterilized, (b2DS) addition of bacteria 2 day before yeast; sterilized, and (B+S) incubate bacteria and yeast simultaneously.

จากการศึกษาสภาวะปลอดเชื้อก่อนใส่ยีสต์ โดยการฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีสต์ (b1DS และ b2DS) ส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เช่น การย่อยสลายน้ำตาลรีดิวซ์ และองค์ประกอบอื่นๆ (nutritional elements) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำให้ปลอดเชื้อ เช่น การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโน (ในวัตถุดิบ) เมื่อโดนความร้อน ทำให้น้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนมาจับกัน เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำตาลรีดิวซ์ให้อยู่ในรูป *N*-Glycosylamine ทำให้ยีสต์ไม่สามารถใช้น้ำตาลในรูปแบบดังกล่าวไปผลิตเอทานอลได้ นอกจากนี้ยังเพิ่มผลผลิตของสารประกอบเฟอร์ฟูรัล (furfural compound) ซึ่งสารเหล่านี้จะยับยั้งการเจริญเติบโตและขัดขวางการทำงานของยีสต์ ทำให้ยีสต์ผลิตเอทานอลได้น้อยลง (Sakai *et al*., 2006; Akao *et al*., 2007) ดังนั้น การเพาะเลี้ยงแบคทีเรียก่อนยีสต์ 1 วัน ไม่ฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีตส์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอล

สรุป

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยงเชื้อเดี่ยว *B. subtilis* ต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ เศษอาหาร 50 กรัม อัตราส่วนต่อน้ำ 1:2 บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในสภาวะไม่เขย่า เป็นสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากตัวอย่างมีความชื้นหรือปริมาณน้ำและอุณหภูมิในการบ่มที่พอเหมาะสม ทำให้เอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลสที่แบคทีเรียสร้างขึ้นสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพ ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดเท่ากับ 73.83 ± 0.36 มิลลิกรัมต่อกรัมเศษอาหารแห้ง นำสภาวะดังกล่าวมาศึกษาการผลิตเอทานอลจากเศษอาหารด้วยเชื้อผสมของ *B. subtilis* และ *S. cerevisiae* พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอลในการหมักแบบ separate hydrolysis and fermentation (SHF) คือ การเพาะเลี้ยง *B. subtilis* ก่อนเชื้อ *S. cerevisiae* 1 วัน โดยไม่ฆ่าแบคทีเรียก่อนใส่ยีสต์ (b1D) อัตราส่วน 10:10 ได้ปริมาณเอทานอลสูงสุด 508.73 ± 21.71 มิลลิกรัมเอทานอลต่อกรัมเศษอาหารแห้ง ซึ่งให้ผลเอทานอลดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการหมักแบบ simultaneous saccharification and fermentation (SSF) จากศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า เศษอาหารสามารถเป็นแหล่งวัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอล และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่เศษอาหารอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้สนับสนุนเศษอาหารและงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุนที่ได้รับการจัดสรรจากรัฐ และขอขอบคุณภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติเละสิ่งแวดล้อม. 2558. (**ร่าง) รายงานสถานการณ์มลพิษขอ. ประเทศไทย ปี 2557**. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/public/News/Files/Draft580318-1.pdf, 20 กันยายน 2558.

ธัญญ์พิชชา เอกบุศย์, ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ วลัยรัตน์ อุตตมะปรากรม. 2557. การศึกษาศักยภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกในประเทศไทย. **วารสารวิจัยพลังงาน** 11 (1): 38-49.

สาวิตรี ลิ่มทอง. 2549. **ความหลากหลายและเทคโนโลยีชีวภาพ**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักวิชาการ สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา. 2557. **ขยะมูลฝอยชุมชน ปัญหาใหญ่ที่ประเทศกำลังเผชิญ**. แหล่งที่มา: http://nrei.rmutsv.ac.th/sites/default/files/poprosal/บทความวิชาการขยะมูลฝอยชุมชนปัญหาใหญ่ที่ประเทศกำลังเผชิญ.pdf, 20 กันยายน 2558.

Akao, S., H. Tsuno and J. Cheon. 2007. Semi-continuous L-lactate fermentation of garbage without sterile condition and analysis of the microbial structure. **Water Research** 41: 1774-80.

APHA (American Public Health Association), American Water Works Association, Water Environment Federation. 1995. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed. Washington, D.C.

Han, H.J., H. Li and S.J. Kim. 2006. Ethanol production by synchronous saccharification and fermentation using food waste. **Korean Society for Biotechnology and Bioengineering** 21(6): 474-478.

Jeihanipour, A. and M.J. Taherzadeh. 2008. Ethanol production from cotton-based waste textiles. **Bioresource Technology** 100: 1007–1010.

Kadar, Z., Z. Szengyel and K. Reczey. 2004. Simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of industrial wastes for the production of ethanol. **Industrial Crops and Products** 20: 103–110.

Kim, J.H., J.C. Lee and D. Pak. 2011. Feasibility of producing ethanol from food waste. **Waste Management** 31: 2121-2125.

Kim, S.D. and B.E. Dale. 2004. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. **Biomass and Bioenergy** 26: 361–375

Lal, R. 2008. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. **Waste Management** 28: 747-758.

Lin, C.S.K., L.A. Pfaltzgraff, L. Herrero-Davila, E.B. Mubofu, S. Abderrahim, J.H. Clark, A.A. Koutinas,

N. Kopsahelias, K. Stamatelatou, F. Dickson, S. Thankappan, Z. Mohamed, R. Brocklesby and R. Luque. 2013. Food waste as a valuable resource for the production of chemicals, materials and fuels. Current situation and global perspective. **Energy and Environmental Science** 6: 426–464.

Miller, G.L. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry** 31: 426-428.

Nielsen, S.S. 2002. **Food analysis**. 1st ed. China Light Industry Press, Beijing.

Pérez-Guerra, N., A. Torrado-Agrasar, C. López-Macias and L. Pastrana. 2003. Main characteristics and applications of solid substrate fermentation. Electronic **Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry** 2: 1-8.

Pokhrel, C.P., R.K.P. Yadav and S. Ohga. 2008. Agriculture waste residue as potential source of bioethanol. **Scientific World** 6: 19-23.

Sakai, K., M. Taniguchi, S. Miura, H. Ohara, T. Matsumoto and Y. Shirai. 2003. Making plastics from garbage: a novel process for poly-l-lactate production from municipal food waste. **Journal of Industrial Ecology** 7(3-4): 63-74.

Sakai, K. and T. Yamanami. 2006. Thermotolerant *Bacillus licheniformis* TY7 produces optically Active L-lactic acid from kitchen refuse under open condition. **Journal of Bioscience Bioengineering** 102: 132-134.

Sayeki, M., T. Kitagawa, M. Matsumoto, A. Nishiyama, K. Miyoshi, M. Mochizuki, A. Takasu and A. Abe. 2001. Chemical composition and energy value of dried meal from food waste as feedstuff in swine and cattle. **Japanese Society of Animal Science** 72: 34–40.

Shanavas, S., G. Padmaja, S.N. Moorthy, M.S. Sajeev and J.T. Sheriff. 2011. Process optimization for bioethanol production from cassava starch using novel ecofriendly enzymes. **Biomass Bioenergy** 31: 901–909.

Silalertruksa, T. and S.H. Gheewala. 2010. Security of feedstocks supply for future bio-ethanol production in Thailand. **Energy Policy** 38: 7476–7486.

Stichnothe, H. and A. Azapagic. 2009. Bioethanol from rice straw: life cycle estimation of the greenhouse gas saving potential. **Resources, Conservation and Recycling** 53: 624-30.

Tao, F., J.Y. Miao, G.Y. Shi and K.C. Zhang. 2005. Ethanol fermentation by an acid-tolerant *Zymomonas mobilis* under non-sterilized condition. **Process Biochemistry** 40:183-187.

Wang X.M., Q.H. Wang, N.Q. Ren and X.Q. Wang. 2005. Lactic acid production from kitchen waste with a newly characterized strain of *Lactobacillus plantarum*. **Chemical & Biochemical Engineering Quarterly** 19(4): 383-389.

Xue, Y., H. Jameel, R. Phillips and H. Chang. 2012. Split addition of enzymes in enzymatic hydrolysis at high solids concentration to increase sugar concentration for bioethanol production. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 18: 707–714.

Yang, X., J.H. Lee, H.Y. Yoo. H.Y. Shin, L.P. Thapa, C. Park and S.W. Kim. 2014. Production of bioethanol and biodiesel using instant noodle waste. **Bioprocess and Biosystems Engineering** 37(8): 1627-1635.

ความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกตัวเต็มวัย และวัยอ่อน ในพื้นที่เกษตรกรรม อำเภอสวนผึ้ง จ.ราชบุรี

Species Diversity of Adult and Larva Amphibians in Agricultural Areas at Suan Phueng District Ratchaburi Province

กาญจนา ชินสำราญ[1] วุฒิ ทักษิณธรรม[2] และ**สุรภพ สุทธิวิเศษ**[1*]

Kanjana Chinsamran[1], Wut Taksintum[2] and Surapop Sutthiwises[1*]

บทคัดย่อ

การศึกษาความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกตัวเต็มวัย และวัยอ่อนในพื้นที่เกษตรกรรมของอำเภอสวนผึ้ง จ.ราชบุรี ระหว่าง ต.ค. 56 – ก.ย. 57 โดยทำการสำรวจสัตว์ในภาคสนาม และจำแนกชนิดด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งสิ้น 16 ชนิด แยกเป็นตัวเต็มวัย 15 ชนิด และลูกอ๊อด 11 ชนิด ในพื้นที่เกษตรกรรมเชิงเดี่ยว 4 รูปแบบ คือ 1) พื้นที่เกษตรกรรมปลูกพืชล้มลุกที่มีการดูแลให้น้ำ 2) พื้นที่เกษตรกรรมปลูกพืชล้มลุกที่ไม่มีการดูแลให้น้ำ 3) พื้นที่เกษตรกรรมปลูกไม้ยืนต้นที่ไม่มีการให้น้ำ และ 4) พื้นที่เกษตรกรรมประเภทนาข้าว พบว่าสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก 13 ชนิด (81.25%) เลือกใช้พื้นที่เกษตรกรรมแบบที่ 3 มากที่สุด ตามด้วยแบบที่ 2 จำนวน 11 ชนิด (68.76%) นอกจากนี้พื้นที่ฟาร์มตัวอย่างตามแนวพระราชดำริบ้านบ่อหวี ซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรแบบผสมผสาน พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก 15 ชนิด (93.75%) ซึ่งมากกว่าพื้นที่เกษตรกรรมเชิงเดี่ยวแบบอื่นๆ ส่วนการใช้สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกเป็นอาหารมีทั้งสิ้น 10 ชนิด (62.5%) โดยชนิดที่นิยมมาก คือ อึ่งเผ้า และกบนา ตามลำดับ

ABSTRACT

The species diversity of both adult and larva anurans in agricultural areas at Suan Phueng district, Ratchaburi province, was studied during Oct. 2013 – Sep. 2014 through field surveys. All anuran specimens were identified by using morphological features. The study revealed 16 species consisting of 15 adult species and 11 tadpole species occurring in 4 types of monoculture area: 1) irrigated herbaceous planting area, 2) non-irrigated herbaceous planting area, 3) non-irrigated tree plantations, and 4) rice paddy field. Analysis of habitat utilization showed that 13 anuran species (81.25%) residing in type 3 area following by type 2 area with 11 anuran species (68.76%). In addition, the demonstration integrated farming area at Ban Bo Wi found 15 anuran species (93.75%) which is the most species diversity than the others. The utilization of anurans as food consumption revealed 10 species (62.5%), the most favorite species are *Glyphoglossus molossus* and *Hoplobatrachus rugulosus* respectively.

Key Words : Species diversity, Amphibians, Suan Phueng district, Ratchaburi province

* Corresponding author; e-mail address: surapop@hotmail.com

[1] สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ 10120
Biology Division, Faculty of Science and Technology, Rajamangala U. of Technology Krungthep, Bangkok 10120

[2] ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
Department of Zoology, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรม และการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์ที่มากขึ้นส่งผลให้สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากถิ่นอาศัยถูกทำลาย (Schoonover *et al*., 2006) สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกมากกว่าร้อยละ 30 ถูกคุกคาม และมีจำนวนประชากรทั่วโลกลดลงอย่างน้อยร้อยละ 43 จากปัญหาสิ่งแวดล้อม (Stuart *et al*., 2004) ทำให้สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกเข้ามาอยู่อาศัยในพื้นที่เกษตรกรรมมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่เกษตรกรรมส่วนใหญ่ในประเทศไทยมีการใช้สารกำจัดศัตรูพืช และสารกำจัดวัชพืช ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดลงของประชากรสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก

ในธรรมชาติสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกกินสัตว์ชนิดอื่นที่มีขนาดเล็กกว่าเป็นอาหาร โดยเฉพาะแมลง ซึ่งหลายชนิดเป็นแมลงศัตรูพืช สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกจึงเป็นสัตว์กลุ่มหนึ่งที่ช่วยควบคุมแมลงศัตรูพืช (Berger *et al*., 1998) อีกทั้งหลายชนิดยังเป็นอาหารของมนุษย์ด้วย สำหรับการศึกษาในประเทศไทยมีรายงานการพบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งสิ้น 168 ชนิด (Frost, 2013) โดยในการศึกษาทางอนุกรมวิธานของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกอาศัยข้อมูลทางชีววิทยา และกายวิภาคของตัวเต็มวัย เช่น ลักษณะของนิ้วตีน ความยาวของกระดูกแข้ง แผ่นหนังที่นิ้วตีน การดูแลตัวอ่อน เป็นต้น (Taylor, 1962)

สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกดำรงชีวิตอยู่ในสภาพนิเวศที่หลากหลายทั้งบนต้นไม้ แหล่งน้ำไหล แหล่งน้ำนิ่งต่างๆ หรือในโพรงดิน อีกทั้งยังมีวงจรชีวิตที่ดำรงชีวิตทั้งบนบก และในน้ำ จากการศึกษาสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าคลองแสง และที่อุทยานแห่งชาติกุยบุรี มีการรายงานชนิดสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกหลายชนิดที่สำรวจพบเฉพาะระยะลูกอ๊อด หรือระยะตัวเต็มวัยเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการศึกษาสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในระยะลูกอ๊อด ทำให้มีโอกาสพบจำนวนชนิดสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกได้เพิ่มขึ้น (วุฒิ และคณะ, 2549; วุฒิ และคณะ, 2553)

การศึกษาความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่เกษตรกรรมของอำเภอสวนผึ้ง จ.ราชบุรี ในครั้งนี้ จึงได้ศึกษาทั้งระยะตัวเต็มวัยและลูกอ๊อดควบคู่กัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่เกษตรกรรม การเลือกใช้พื้นที่ของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่เกษตรกรรม รวมทั้งการใช้ประโยชน์จากสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่เกษตรกรรมในด้านอาหาร ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการอนุรักษ์ เพราะการอนุรักษ์สัตว์จำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับตัวสัตว์ และสภาพนิเวศที่สัตว์ใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นข้อมูลความหลากหลายทางชีวภาพในประเทศไทย ที่สามารถนำไปสู่การบริหารจัดการการใช้ที่ดิน การอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และการใช้ประโยชน์จากสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การกำหนดพื้นที่เกษตรกรรม

ศึกษาการใช้ประโยชน์ และภูมิปัญญาท้องถิ่นที่เกี่ยวข้องกับสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่ อำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี ซึ่งประกอบด้วย 4 ตำบล คือ ตำบลสวนผึ้ง ตำบลท่าเคย ตำบลป่าหวาย และตำบลตะนาวศรี โดยการลงพื้นที่สำรวจ ศึกษาสภาพนิเวศเพื่อจำแนกประเภทพื้นที่เกษตรกรรมเชิงเดี่ยว และพื้นที่เกษตรแบบผสมผสาน

การสำรวจและระบุชนิดสัตว์ในภาคสนาม

ทำการลงพื้นที่สำรวจสัตว์ในภาคสนาม ที่เขตอำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี 12 ครั้ง ตลอดโครงการ โดยทำการถ่ายภาพ บันทึกข้อมูล และจำแนกชนิดตัวเต็มวัยในภาคสนาม ในกรณีที่ไม่สามารถระบุชนิดสัตว์ได้ในภาคสนามทั้งตัวเต็มวัย และลูกอ๊อด จะเก็บตัวอย่างสัตว์กลับมายังห้องปฏิบัติการ ทำการดองในฟอร์มาลีน 10% แล้วนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานตามวิธีของ Taylor (1962) เพื่อระบุชนิด โดยลักษณะที่ใช้ระบุชนิดตัวเต็มวัย เช่น ลักษณะของนิ้วตีน ความยาวกระดูกแข้ง ส่วนลักษณะที่ใช้ระบุชนิดลูกอ๊อด เช่น โครงสร้างปาก ช่องเปิดเหงือก ลักษณะครีบ

การศึกษาความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่เกษตรกรรม

เมื่อสามารถระบุชนิดสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งในภาคสนาม และในห้องปฏิบัติการได้ จึงนำผลการศึกษามาวิเคราะห์ความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่พบในพื้นที่เกษตรกรรม อำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี รวมทั้ง ทำการวิเคราะห์การเลือกใช้พื้นที่เกษตรกรรม ทั้งในตัวเต็มวัย และลูกอ๊อด รวมทั้งนำมาวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ของมนุษย์ในด้านการใช้เป็นอาหาร

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่เกษตรกรรมเขตอำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี โดยวิธีการสำรวจสัตว์ในพื้นที่ และเก็บตัวอย่างสัตว์ที่พบเห็นโดยตรง ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2556 – กันยายน 2557 ในพื้นที่ทั้ง 4 ตำบลของอำเภอสวนผึ้ง ได้แก่ ตำบลสวนผึ้ง ตำบลท่าเคย ตำบลป่าหวาย และตำบลตะนาวศรี พบว่า มีสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก 1 อันดับ (order) 4 วงศ์ (family) 11 สกุล (genus) 16 ชนิด (species) จำแนกเป็น ตัวเต็มวัย 15 ชนิด และลูกอ๊อด 11 ชนิด โดยสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่พบมากที่สุดมีเท่ากัน 2 วงศ์ คือวงศ์ Dicroglossidae จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ กบหนอง กบนา เขียดจะนา เขียดหลังปุ่ม เขียดบัวหรือเขียดจิก เขียดอ่องเล็ก เขียดหลังไพล และวงศ์ Microhylidae จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ อึ่งแดง อึ่งปากขวด อึ่งอ่างบ้าน อึ่งน้ำเต้า อึ่งขาคำ อึ่งข้างดำ และอึ่งหลังขีด ดังแสดงไว้ใน Table 1

Table 1 Anuran species founded in agricultural areas at Suan Phueng District Ratchaburi Province

Family	Common name (*in Thai*)	Scientific name
Family Bufonidae	คางคกบ้าน	*Duttaphrynus melanostictus*
Family Dicroglossidae	กบหนอง	*Fejervaya limnocharis*
	กบนา	*Hoplobatrachus rugulosus*
	เขียดจะนา	*Occidozyga lima*
	เขียดหลังปุ่ม	*Occidozyga martensii*
	เขียดบัว, เขียดจิก	*Hylarana erythraea*

Table 1 Cont.

Family	Common name (*in Thai*)	Scientific name
	เขียดอ่องเล็ก	*Hylarana nigrovittata*
	เขียดหลังไพล	*Pelophylax lateralis*
Family Microhylidae	อึ่งแดง	*Calluella guttulata*
	อึ่งเผ้า / อึ่งปากขวด	*Glyphoglossus molossus*
	อึ่งอ่างบ้าน	*Kaloula pulchra*
	อึ่งน้ำเต้า	*Microhyla fissipes*
	อึ่งข้างดำ	*Microhyla heymonsi*
	อึ่งขาคำ	*Microhyla pulchra*
	อึ่งหลังขีด	*Micryletta Inornata*
Family Rhacophoridae	ปาดบ้าน	*Polypedates leucomystax*

พื้นที่เกษตรกรรมเชิงเดี่ยวที่ศึกษาสามารถจำแนกตามสภาพนิเวศออกได้ 4 ประเภท ดังนี้

1. พื้นที่เกษตรกรรมปลูกพืชล้มลุกที่มีการดูแลให้น้ำ มีการไถพรวนดินเพื่อทำการเกษตรตามวงจรการปลูกพืชแต่ละชนิด เรือนยอดของพืชปกคลุมดินน้อย และถูกเปิดโล่งในช่วงที่มีการเตรียมดิน เช่น แปลงปลูกผักต่างๆ หรือถั่วฝักยาว เป็นต้น เป็นพื้นที่ซึ่งมีกิจกรรมของมนุษย์อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในเวลากลางวัน พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกจำนวน 6 ชนิด ได้แก่ ปาดบ้าน กบหนอง อึ่งน้ำเต้า อึ่งข้างดำ อึ่งขาคำ และคางคกบ้าน

2. พื้นที่เกษตรกรรมปลูกพืชล้มลุกที่ไม่มีการดูแลให้น้ำ มีการไถพรวนดินเพื่อทำการเกษตรตามวงจรการปลูกพืชแต่ละชนิด เรือนยอดของพืชปกคลุมดินปานกลาง และถูกเปิดโล่งในช่วงที่มีการเตรียมดิน เช่น ไร่มันสำปะหลัง เป็นต้น เป็นพื้นที่ซึ่งมีกิจกรรมของมนุษย์น้อย เฉพาะช่วงการเก็บเกี่ยวผลผลิต และการเตรียมดิน พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกจำนวน 11 ชนิด ได้แก่ กบหนอง กบนา เขียดอ่องเล็ก เขียดหลังไพล เขียดหลังปุ่ม เขียดจะนา เขียดบัว อึ่งน้ำเต้า อึ่งข้างดำ อึ่งขาคำ และคางคกบ้าน

3. พื้นที่เกษตรกรรมปลูกไม้ยืนต้นที่ไม่มีการให้น้ำ มีการไถพรวนดินเพื่อทำการเกษตรน้อย หรือไม่มีเลย เรือนยอดของพืชปกคลุมดินค่อนข้างมาก เช่น สวนมะพร้าว สวนสน เป็นต้น เป็นพื้นที่ซึ่งมีกิจกรรมของมนุษย์น้อย เฉพาะช่วงการเก็บเกี่ยวผลผลิตเท่านั้น พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกจำนวน 13 ชนิด ได้แก่ ปาดบ้าน กบหนอง กบนา เขียดหลังปุ่ม เขียดหลังไพล อึ่งแดง อึ่งปากขวด อึ่งอ่างบ้าน อึ่งน้ำเต้า อึ่งข้างดำ อึ่งขาคำ อึ่งหลังขีด และคางคกบ้าน

4. พื้นที่เกษตรกรรมประเภทนาข้าว มีการไถพรวนดินเพื่อทำการเกษตรเป็นประจำทุกปีตามวงจรการปลูกข้าว เรือนยอดของพืชมีการปกคลุมดินน้อย และถูกเปิดโล่งในช่วงที่มีการเตรียมดิน และอาจถูกเผาก่อนการเตรียมดิน เป็นพื้นที่ที่มีกิจกรรมของมนุษย์อย่างต่อเนื่องเฉพาะช่วงเพาะปลูก และเป็นกิจกรรมในเวลากลางวัน พื้นที่ประเภทนี้มักอยู่ในพื้นที่ลุ่ม หรือใกล้แหล่งน้ำ พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกจำนวน 7 ชนิด ประกอบด้วย ปาดบ้าน กบหนอง กบนา เขียดจะนา เขียดหลังปุ่ม อึ่งน้ำเต้า และอึ่งข้างดำ

สำหรับพื้นที่เกษตรแบบผสมผสานในการศึกษาครั้งนี้ คือ พื้นที่เกษตรแบบผสมผสานที่ฟาร์มตัวอย่างตามแนวพระราชดำริบ้านบ่อหวี ซึ่งเป็นพื้นที่การเกษตรที่ปลูกพืช หรือเลี้ยงสัตว์หลายชนิดในพื้นที่เดียวกัน มีกิจกรรมที่สามารถเกื้อกูลกัน รวมถึงมีการใช้ทรัพยากรดิน น้ำ แสงแดด อย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมดุลและประโยชน์สูงสุด โดยผลการศึกษาการเลือกใช้พื้นที่เกษตรกรรมของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้ง 16 ชนิด แสดงใน Table 2

Table 2 Habitat selection of anuran species in different agricultural areas.

Anuran species	Monoculture areas				Integrated farming area	Adults	Tadpoles
	1	2	3	4			
Family Bufonidae							
Duttaphrynus melanostictus	/	/	/		/	/	/
Family Dicroglossidae							
Fejervaya limnocharis	/	/	/	/	/	/	/
Hoplobatrachus rugulosus		/	/	/	/	/	/
Occidozyga lima		/		/	/	/	
Occidozyga martensii		/	/	/	/	/	/
Hylarana erythraea		/			/	/	
Hylarana nigrovittata		/			/	/	
Pelophylax lateralis		/	/				/
Family Microhylidae							
Calluella guttulata			/		/	/	/
Glyphoglossus molossus			/		/	/	/
Kaloula pulchra			/		/	/	
Microhyla fissipes	/	/	/	/	/	/	/
Microhyla heymonsi	/	/	/	/	/	/	/
Microhyla pulchra	/	/	/		/	/	/
Micryletta inornata			/		/	/	
Family Rhacophoridae							
Polypedates leucomystax	/		/	/	/	/	/
Total	**6**	**11**	**13**	**8**	**15**	**15**	**11**

Notes: / = present; Monoculture areas 1 = irrigated herbaceous planting area, 2 = non-irrigated herbaceous planting area 3 = non-irrigated tree plantations, 4 = rice paddy field

ผลการสำรวจแสดงให้เห็นว่าพื้นที่เกษตรกรรมประเภทที่ 3 ที่ปลูกไม้ยืนต้นและไม่มีการให้น้ำ มีเรือนยอดของพืชปกคลุมดินมาก พบจำนวนชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Urbina-Cardona *et al*. (2006) ที่กล่าวว่าเรือนยอดของพืชปกคลุมดินส่งผลต่อความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก โดยพื้นที่ที่มีเรือนยอดของพืชปกคลุมมาก จะพบความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกมาก

นอกจากนี้กิจกรรมของมนุษย์ ยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกใช้พื้นที่ของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก โดยการศึกษาของ Ficetola and Bernardi (2004) กล่าวว่า สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกชนิดที่สามารถแพร่กระจายในพื้นที่ที่มีกิจกรรมของมนุษย์ เป็นชนิดที่พบได้ทั่วไป และสามารถแพร่กระจายได้กว้าง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่าสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกหลายชนิดที่พบในพื้นที่ที่มีกิจกรรมของมนุษย์มาก (พื้นที่ประเภทที่ 1 และ 4) สามารถพบได้ในพื้นที่เกษตรกรรมอีก 2 ประเภทด้วย เช่น กบหนอง อึ่งน้ำเต้า อึ่งข้างดำ เป็นต้น

หากเปรียบเทียบจำนวนชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่พบในพื้นเกษตรเชิงเดี่ยว และพื้นที่เกษตรแบบผสมผสานที่ฟาร์มตัวอย่างตามแนวพระราชดำริบ้านบ่อหวี พบว่า พื้นที่ฟาร์มตัวอย่างพบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งสิ้น 15 ชนิด จากทั้งสิ้น 16 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 93.75 ขณะที่พื้นที่เกษตรกรรมเชิงเดี่ยวแบบที่ 3 ซึ่งมีความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกมากที่สุดในบรรดาพื้นที่เกษตรกรรมเชิงเดี่ยว พบเพียง 13 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 81.25 ซึ่งน้อยกว่าพื้นที่เกษตรแบบผสมผสานที่มีความหลากหลายของพืชมากกว่า ผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของวุฒิ และคณะ (2553) ที่ศึกษาเปรียบการใช้พื้นที่อาศัยของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่อุทยานแห่งชาติกุยบุรี และพื้นที่เกษตรกรรมใกล้เคียง โดยพบว่าพื้นที่ที่มีความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกมากที่สุดได้แก่ พื้นที่ป่า พื้นที่ชายป่า และพื้นที่เกษตรกรรม ตามลำดับ

สำหรับการเลือกใช้พื้นที่เกษตรกรรมเป็นแหล่งอาศัยของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับตัวเพื่อใช้ประโยชน์ในพื้นที่เกษตรกรรมแต่ละประเภทได้แตกต่างกัน โดยสามารถจำแนกสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกออกได้เป็น 4 กลุ่ม

1. กลุ่มที่มีความสามารถในการปรับตัวได้ดี พบในพื้นที่เกษตรกรรมทั้ง 4 แบบ มี 3 ชนิด ได้แก่ กบหนอง อึ่งน้ำเต้า และอึ่งข้างดำ

2. กลุ่มที่มีความสามารถในการปรับตัวได้ พบในพื้นที่เกษตรกรรม 3 แบบ มี 5 ชนิด ได้แก่ คางคกบ้าน กบนา เขียดหลังปุ่ม อึ่งขาคำ และปาดบ้าน

3. กลุ่มที่มีความสามารถในการปรับตัวได้น้อย พบในพื้นที่เกษตรกรรม 2 แบบ มี 2 ชนิด ได้แก่ เขียดจะนา และเขียดหลังไพล

4. กลุ่มที่มีความสามารถในการปรับตัวได้น้อยมาก พบในพื้นที่เกษตรกรรมเพียง 1 แบบ มีจำนวน 6 ชนิด ได้แก่ เขียดบัว เขียดอ่องเล็ก อึ่งแดง อึ่งปากขวด อึ่งอ่างบ้าน และอึ่งหลังขีด

สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่สำรวจพบทั้ง 16 ชนิด มีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอาหารทั้งสิ้น 10 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 62.5 ได้แก่ กบหนอง กบนา เขียดจะนา อึ่งแดง อึ่งเผ้าหรืออึ่งปากขวด อึ่งอ่างบ้าน อึ่งน้ำเต้า อึ่งข้างดำ อึ่งขาคำ อึ่งหลังขีด โดยชนิดที่นิยมบริโภคมากที่สุด คือ อึ่งเผ้า เนื่องจากมีรสชาติดี พบในช่วงเวลาสั้นๆ ของปีเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ทำให้มีราคาจำหน่ายสูงถึงกิโลกรัมละ 180 – 200 บาท ส่วนชนิดที่นิยมในอันดับรองลงมา คือ กบนา ซึ่งมีจำหน่ายเกือบทั้งปี ดังนั้นหากเกษตรกรต้องการบริโภค หรือจับสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก เช่น อึ่งเผ้า มาจำหน่ายให้ได้ในปริมาณมาก ก็ทำได้โดยการจัดการพื้นที่เกษตรกรรมให้มีสภาพนิเวศที่เหมาะกับ

การเลือกใช้ของอึ่งเผ้า คือ พื้นที่เกษตรกรรมประเภทที่ 3 ซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมปลูกไม้ยืนต้นที่ไม่มีการให้น้ำ มีการไถพรวนดินเพื่อทำการเกษตรน้อย เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณอึ่งเผ้าในพื้นที่ หรืออาจเลือกบริหารจัดการพื้นที่เกษตรในลักษณะผสมผสานตามรูปแบบของฟาร์มตัวอย่าง เป็นต้น

จากผลการศึกษาความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในเขตอำเภอสวนผึ้ง พบว่ามีสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกอีกหลายชนิด ที่มีข้อมูลด้านต่างๆ อยู่น้อยมาก และบางชนิดอาจสูญหายไปจากพื้นที่ได้ในอนาคตอันใกล้ เนื่องจากพื้นที่อาศัยในเขตอำเภอสวนผึ้งมีการเปลี่ยนสภาพพื้นที่จากพื้นที่เกษตรกรรมไปเป็นรีสอร์ทเพิ่มมากขึ้น เพื่อรองรับการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจการท่องเที่ยว จึงควรเร่งศึกษาหาข้อมูลพื้นฐานของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่ เพื่อให้ประชากรในชุมชนตระหนักถึงความสำคัญ และการอนุรักษ์สัตว์กลุ่มนี้ ไม่ให้เกิดการสูญพันธุ์จากแหล่งอาศัยตามธรรมชาติ โดยสามารถจัดการพื้นที่เกษตรกรรมให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อให้สามารถฟื้นฟูประชากรสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกได้

สรุป

จากการศึกษาความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่เกษตรกรรมของอำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี ตั้งแต่เดือนตุลาคม 2556 – กันยายน 2557 ได้กำหนดพื้นที่เกษตรกรรมออกเป็น 4 รูปแบบ คือ พื้นที่เกษตรกรรมปลูกพืชล้มลุกที่มีการดูแลให้น้ำ พื้นที่เกษตรกรรมปลูกพืชล้มลุกที่ไม่มีการดูแลให้น้ำ พื้นที่เกษตรกรรมปลูกไม้ยืนต้นที่ไม่มีการให้น้ำ และพื้นที่เกษตรกรรมประเภทนาข้าว พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งสิ้น 16 ชนิด โดยพบตัวเต็มวัย 15 ชนิด และลูกอ๊อดจำนวน 11 ชนิด โดยสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกเลือกใช้ประโยชน์พื้นที่เกษตรกรรมปลูกไม้ยืนต้นที่ไม่มีการให้น้ำ เป็นแหล่งอาศัยมากที่สุดจำนวน 13 ชนิด (ร้อยละ 81.25) และรองลงมาคือ พื้นที่เกษตรกรรมปลูกพืชล้มลุกที่ไม่มีการดูแลให้น้ำจำนวน 11 ชนิด (ร้อยละ 68.76) นอกจากนั้นยังพบว่าพื้นที่เกษตรกรรมแบบผสมผสานของฟาร์มตัวอย่างมีความหลากชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกจำนวน 15 ชนิด (ร้อยละ 93.75) ซึ่งมากกว่าพื้นที่เกษตรกรรมเชิงเดี่ยว การใช้ประโยชน์ทางด้านอาหาร พบว่า อึ่งเผ้าเป็นสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่ประชาชนท้องถิ่นนิยมบริโภค และมีราคาจำหน่ายสูงที่สุด รองลงมาคือกบนา โดยพื้นที่เกษตรกรรมเชิงเดี่ยวที่อึ่งเผ้า และกบนาเลือกเป็นพื้นที่อาศัยคือ พื้นที่เกษตรกรรมปลูกไม้ยืนต้นที่ไม่มีการให้น้ำ รวมทั้งพื้นที่เกษตรกรรมแบบผสมผสานของฟาร์มตัวอย่างด้วย ดังนั้นหากเกษตรกรต้องการให้พื้นที่เกษตรกรรมมีอึ่งเผ้าอยู่มาก เพื่อใช้ในการบริโภค หรือจำหน่าย ควรจัดแบ่งพื้นที่เกษตรกรรมบางส่วน ให้เป็นพื้นที่เกษตรกรรมปลูกไม้ยืนต้นที่ไม่มีการให้น้ำ มีการไถพรวนดินเพื่อทำการเกษตรเพียงบางส่วน หรืออาจเลือกจัดการพื้นที่เกษตรในลักษณะของฟาร์มตัวอย่างแบบผสมผสาน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ประจำปีงบประมาณ 2557 ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วีรยุทธ์ เลาหะจินดา ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการทำวิจัยและร่วมเดินทางสำรวจในภาคสนาม ขอขอบคุณผู้จัดการโครงการฟาร์มตัวอย่างตามพระราชดำริบ้านบ่อหวี ที่อนุญาตให้เข้าใช้พื้นที่ศึกษา เก็บตัวอย่าง และประชาสัมพันธ์โครงการ ขอขอบคุณเกษตรกรทุกท่านในตำบลต่างๆ ในเขตอำเภอสวนผึ้งที่อนุญาตให้เข้าใช้พื้นที่ศึกษา และให้ข้อมูลวิถีชีวิตของเกษตรกร ข้อมูลเกี่ยวกับชนิด

และการใช้ประโยชน์สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก ขอขอบคุณภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิจัย และขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่มีส่วนส่งเสริม สนับสนุนให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

วุฒิ ทักษิณธรรม, วัชราภรณ์ รวมธรรม, บุญลือ พูลนิล และวีรยุทธ์ เลาหะจินดา. 2553. การศึกษาเปรียบเทียบความหลากชนิดกบและการเลือกใช้ถิ่นอาศัยในพื้นที่อุทยานแห่งชาติกุยบุรี และพื้นที่เกษตรกรรมใกล้เคียง. **วารสารสัตว์ป่าเมืองไทย** 17 (1): 104-123.

_____, วีรยุทธ์ เลาหะจินดา และบุษบง กาญจนสาขา. 2549. ความหลากชนิดของกบในพื้นที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าคลองแสง จังหวัดสุราษฎร์ธานี. **วารสารสัตว์ป่าเมืองไทย** 13 (1): 178-188.

Berger, L., R. Speare, P. Daszak, D. E. Green, A. A. Cunningham, C. L. Goggin, R. Slocombe, M. A. Ragan, A. D. Hyatt, K. R. McDonald, H. B. Hines, K. R. Lips, G. Marantelli and H. Parkes. 1998. Chytridiomycosis causes amphibian mortality associated with population declines in the rainforests of Australia and Central America, pp. 9031–9036. *In* **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 95.** July 1998, Natl. Acad. Sci., USA

Ficetola, G. F. and Bernardi, F. D. 2004. Amphibians in a human-dominated landscape: the community structure is related to habitat features and isolation. **Biological Conservation** 119: 219–230.

Frost, D. R. 2013. **Amphibian Species of the World: an Online Reference Version 5.6.** Available Source: http://research.amnh.org/vz/herpetology/amphibia/, July 12, 2013

Schoonover, J. E., B. G. Lockably and B. S. Helms. 2006. Impacts of land cover on stream hydrology in the West Georgia Piedmont, USA. **J. Env. Qual.** 35: 2123–2131.

Stuart, S. N., J. S. Chanson., N. A. Cox, B. E. Young, A. S. L. Rodriques, D. L. Fishman and R. W. Waller. 2004. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. **J. Sci.** 306: 1783–1786.

Taylor, E. H. 1962. The amphibian fauna of Thailand. **The Univ. of Kansas Sci. Bull.** 43: 265–599.

Urbina-Cardona, J. N., Olivares-Pe'rez, M. and Reynoso, V. H. 2006. Herpetofauna diversity and microenvironment correlates across a posture-edge-interior ecotone in tropical rainforest fragments in the Los Tuxtlas Biosphere Reserve of Veracruz. **Mexico Biological Conservation** 132: 61–75.

การศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแม่น้ำแม่กลอง โดยใช้เทคนิค Fluorescence spectroscopy

Study of characteristics of dissolved organic matter in Mae Klong River using fluorescence spectroscopy

มารุต สุขสมจิตร* ไตรเทพ วิชย์โกวิทเทน และ กฤติฏิ์สุดา ภู่นาค

Marut Suksomjit*, Tritep Vichkovitten and Krittisuda Phunark

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเทคนิค Fluorescence excitation-emission matrix (FEEM) spectroscopy ในแม่น้ำแม่กลองที่มีการพัฒนาพื้นที่ไปใช้ประโยชน์เป็นทั้งแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม และเกษตรกรรม ผลการศึกษาพบความแตกต่างของคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานีต่างๆ โดยตัวอย่างส่วนใหญ่มีสารที่มีคุณสมบัติฟลูออเรสเซนส์กลุ่ม Humic acid-like เป็นองค์ประกอบหลัก ยกเว้นตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานี MK2 และ MK7 ที่มีคุณลักษณะแตกต่างจากบริเวณอื่นๆ โดยพบสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์คล้ายสารกลุ่ม simple aromatic proteins และสารกลุ่ม soluble microbial byproduct-like เป็นองค์ประกอบ ซึ่งความแตกต่างของคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่พบในการศึกษาครั้งนี้เป็นผลมาจากการระบายน้ำเสียจากแหล่งชุมชนลงแหล่งน้ำ (MK2) และอิทธิพลจากแพลงก์ตอนพืชที่มีอยู่มากในบริเวณนั้น (MK7) จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าการระบายน้ำเสียจากบ้านเรือนและแพลงก์ตอนพืชมีบทบาทสำคัญต่อคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่พบในแม่น้ำแม่กลอง

ABSTRACT

This study investigated the characteristics of dissolved organic matter (DOM) using fluorescence excitation-emission matrix (FEEM) spectroscopy in Mae Klong River, which land along the river is used for urban, industry and agriculture. The results showed that there is a difference of DOM characteristic in water samples collected from sampling stations. Throughout the river, humic acid-like substances is the major component except for station MK2 and MK7. Two fluorescence like substances of simple aromatic proteins and soluble microbial byproduct are the major component in water samples. A distinction of DOM characteristic as found in this study might be caused by the discharge of domestic wastewater from urban and industry (MK2) and the influence of phytoplankton (MK7). From our results, we concluded that the discharge of wastewater and phytoplankton have a great role in the characteristic of DOM in Mae Klong River.

Key Words: Dissolved Organic Matter, Mae Klong River, Fluorescence excitation-emission matrix (FEEM) Spectroscopy

*Corresponding Author; E-mail address: marut37@yahoo.com

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathumthani 12120

คำนำ

สารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved Organic Matter, DOM) หมายถึงสารมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และมีธาตุไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบร่วมอยู่ โดยอยู่ในรูปแบบที่ละลายน้ำ สารอินทรีย์ละลายน้ำที่พบในแหล่งน้ำจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ละลายน้ำหลายชนิดซึ่งมีแหล่งที่มาได้ทั้งจากกิจกรรมของมนุษย์ (allochthonous) เช่น การระบายน้ำทิ้งจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม กิจกรรมการเกษตรต่างๆ (ฟาร์มปศุสัตว์ นาข้าว บ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ) และกระบวนการทางธรรมชาติ (autochthonous) เช่น การปลดปล่อยจากสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ เช่น แพลงก์ตอนพืช แพลงก์ตอนสัตว์ สาหร่าย สัตว์น้ำ การชะล้างสารอินทรีย์ที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของสิ่งมีชีวิตลงสู่แหล่งน้ำโดยน้ำฝน (water runoff) สารอินทรีย์ละลายน้ำมีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศแหล่งน้ำหลายด้าน เช่น มีบทบาทสำคัญในวัฏจักรคาร์บอน เป็นแหล่งพลังงาน (energy source) ของแบคทีเรียในแหล่งน้ำ มีผลต่อปริมาณและความเป็นพิษของโลหะหนักในแหล่งน้ำ (Ogawa and Tanoue, 2003) สัมพันธ์กับการเกิดปรากฏการณ์ที่สาหร่ายที่เป็นอันตรายเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว (Anderson *et al*., 2008) เป็นต้น โดยบทบาทจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแหล่งน้ำนั้นๆ (Fellman *et al*., 2010)

เทคนิค Fluorescence excitation-emission matrix (FEEM) spectroscopy เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลของสารมีการเปลี่ยนไปสู่ระดับชั้นที่มีพลังงานสูงขึ้น (excite state) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงาน และปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงเพื่อกลับเข้าสู่สถานะพื้น (ground state) ซึ่งพลังงานที่กระตุ้น (excitation) และปล่อยออก (emission) จะมีความเฉพาะเจาะจงกับโครงสร้างของโมเลกุล ในปัจจุบันเทคนิค FEEM spectroscopy ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแหล่งน้ำต่างๆ รวมทั้งการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ละลายน้ำตามช่วงเวลา หรือตามการใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมทั้งใช้ในการติดตามการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ปลดปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์ (Baker, 2002a; Baker, 2002b; Coble *et al*., 1998; Fellman *et al*., 2010; Nagao *et al*., 2003; Sasaki *et al*., 2005; Stedmon and Markager, 2005; Suksomjit *et al*., 2009) เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวสามารถทำได้ง่าย ไม่ต้องมีการเตรียมตัวอย่าง ใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่นานนัก และสามารถแสดงคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำว่าประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่มใดบ้าง

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากแม่น้ำแม่กลอง ซึ่งพื้นที่บางส่วนถูกพัฒนาไปใช้ประโยชน์เป็นแหล่งชุมชน แหล่งท่องเที่ยว โรงงานอุตสาหกรรม ในขณะที่บางส่วนยังคงเป็นพื้นที่เกษตรกรรม โดยนำเอาเทคนิค FEEM spectroscopy มาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ข้อมูลที่ได้นอกจากจะทำให้เรามีความเข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในบริเวณต่างๆ ของแม่น้ำแม่กลองที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน ข้อมูลความสัมพันธ์ของสารอินทรีย์ละลายน้ำกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน หรือปัจจัยแวดล้อมต่างๆ สามารถนำไปใช้ในการระบุปัจจัยที่ทำให้เกิดการผันแปรของคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแม่น้ำแม่กลองอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแม่น้ำแม่กลอง โดยเก็บตัวอย่างน้ำ (ผิวน้ำ) ตั้งแต่ปากแม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม ถึงอำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2558 มีจำนวน

สถานีเก็บตัวอย่างน้ำทั้งสิ้น 12 จุด (Figure 1) โดยกรองตัวอย่างน้ำทันทีผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Whatman GF/F) ขนาด 25 มิลลิเมตร ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่อาจตกค้างอยู่บนกระดาษกรอง เก็บตัวอย่างน้ำที่กรองได้ในขวดแก้วสีชา โดยอุปกรณ์ที่ต้องสัมผัสกับตัวอย่างจะต้องผ่านการล้างทำความสะอาดตามปกติ และนำไปแช่ในกรดเกลือเข้มข้น 10% ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้งานเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่อาจตกค้างบนภาชนะ แช่ตัวอย่างไว้ในที่เย็น (4 องศาเซลเซียส) และปราศจากแสงจนกว่าจะขนส่งถึงห้องปฏิบัติการก่อนนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ภายใน 1 สัปดาห์ ทำการตรวจวัดคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำของตัวอย่างน้ำด้วยเครื่อง JASCO Spectrofluorometer รุ่น FP-6200 ตั้งค่าความยาวคลื่น excitation และ emission ระหว่าง 220-550 นาโนเมตร ตั้งค่า Band Width ที่ 5 นาโนเมตร และกำหนดความเร็วในการตรวจวัด 1,000 นาโนเมตรต่อวินาที ใช้คิวเวตต์ที่ทำจาก quartz ขนาด 1 เซนติเมตร ในการตรวจวัด และใช้น้ำ Milli-Q เป็น blank และใช้สารละลาย Quinine sulfate dihydrate (Wako) เข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ใน 0.05 M H_2SO_4 เพื่อตรวจสอบสถานะของเครื่องมือตามวิธีการของ Nagao *et al.* (1997) ค่าที่ตรวจวัดได้จะถูกนำมาสร้างเป็น 3-dimension excitation emission (3D-EEM) ฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัม โดยแกน x แทนค่า emission และแกน y แทนค่า excitation มีหน่วยเป็นนาโนเมตร (nm) สำหรับแกน z แทนค่าความเข้ม (Fluorescence intensity, FI) ที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ ระบุตำแหน่งของพีคโดยพิจารณาจากตำแหน่งที่มีค่า FI สูงสุด และรายงานเป็นค่า excitation และ emission (ex./em.)

การตรวจวัดคุณภาพน้ำได้แก่ ค่าความโปร่งใส ความเค็ม ความเป็นกรด-ด่าง กรองตัวอย่างน้ำผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Whatman GF/F) ขนาด 47 มิลลิเมตร ก่อนนำไปตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และนำตัวอย่างน้ำที่กรองได้ไปตรวจวัดปริมาณสารอาหาร (NH_4^+, NO_3^-, PO_4^{3-}) ตามวิธีการของ Strickland and Parsons (1972) พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่จังหวัดสมุทรสงครามและราชบุรีจากกรมพัฒนาที่ดิน

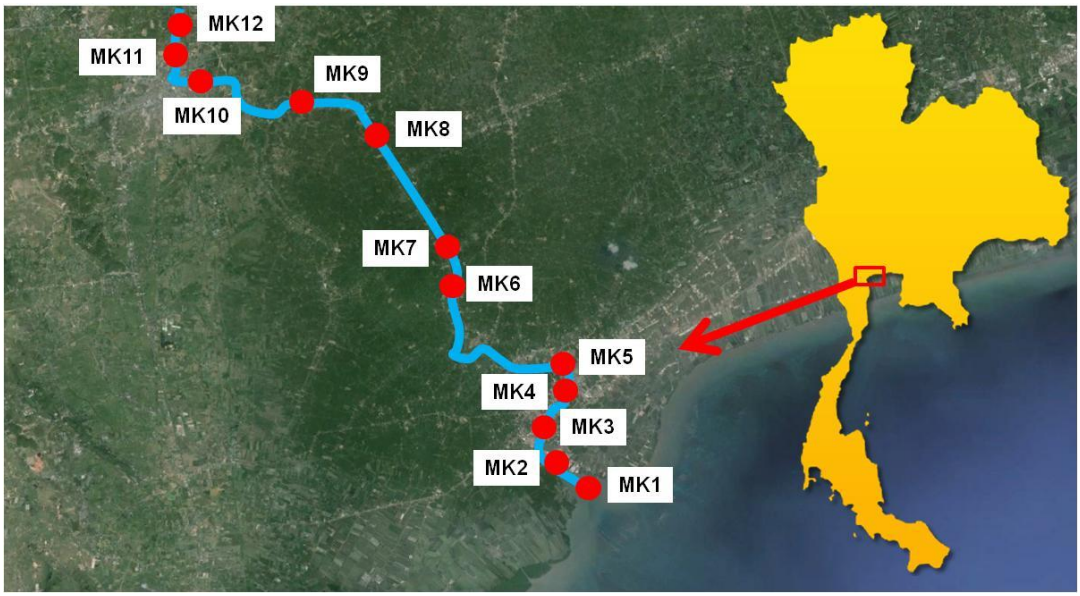


Figure 1 Location of Mae Klong River, Thailand. Symbol indicates the sampling site.

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยใช้เทคนิค FEEM spectroscopy พบว่าตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานีต่างๆ ในแม่น้ำแม่กลองมีคุณลักษณะแตกต่างกัน โดยตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานี MK2 และ MK7 มีพีคปรากฏบนฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัมแตกต่างจากตัวอย่างน้ำที่เก็บจากบริเวณอื่นๆ ของแม่น้ำแม่กลอง โดยฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัมของตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานี MK2 มีพีคปรากฏ 2 ตำแหน่ง (ex./em.) ได้แก่ 245/342 และ 295/342 นาโนเมตร ในขณะที่ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานี MK7 มีพีคปรากฏ 4 ตำแหน่ง ได้แก่ 235/349 260/375 285/357 และ 330/410 นาโนเมตร สำหรับตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานีอื่นๆ มีพีคปรากฏ 2 ตำแหน่ง ได้แก่ 270-285/410-435 และ 330-335/410-422 นาโนเมตร ดังแสดงรายละเอียดตาม Figure 2

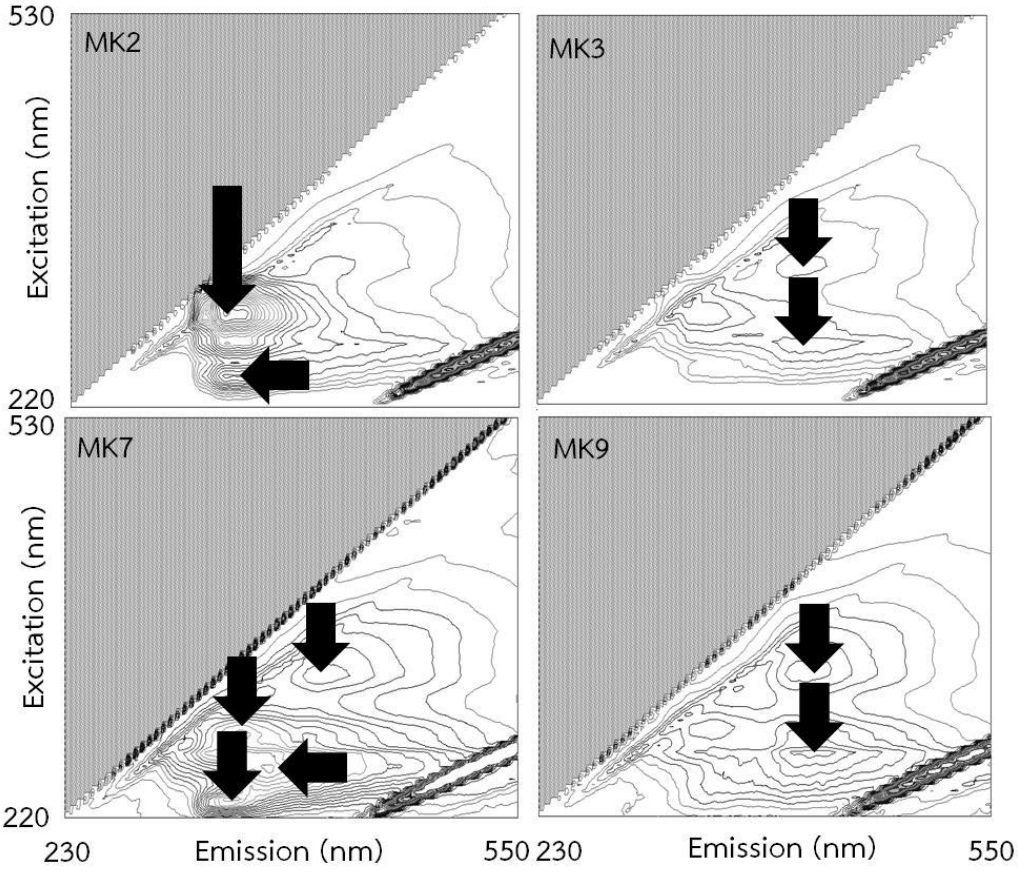
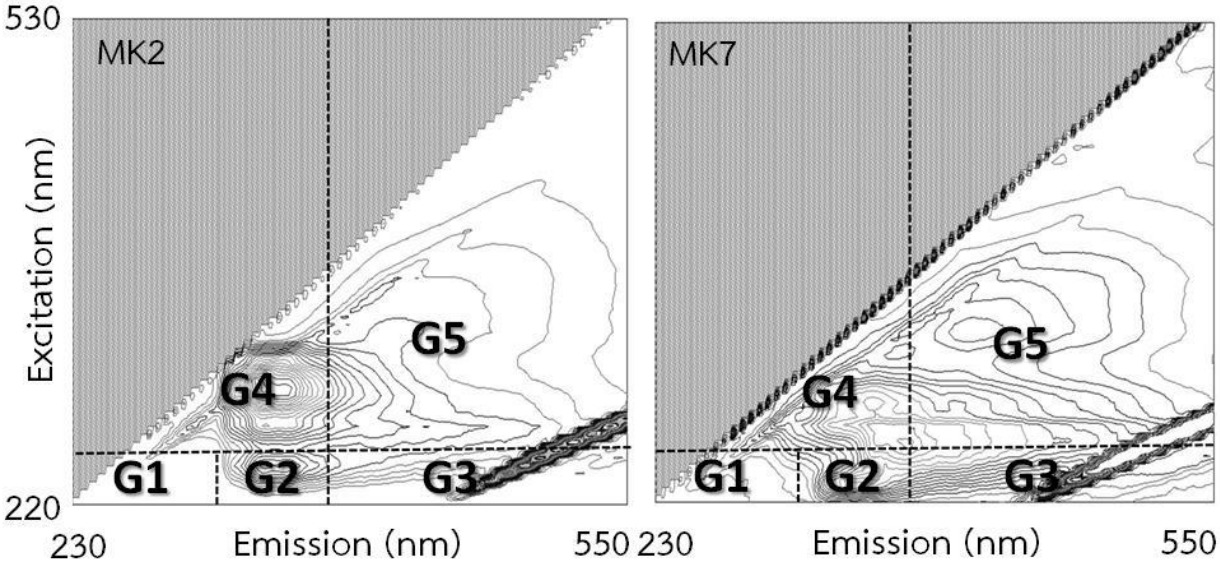


Figure 2 Example of 3D-EEM fluorescence spectrum of some water samples (MK2 MK3 MK7 MK9) collected from Mae Klong River. Arrows indicated the peak position. The intervals of the contours were 1 Fluorescence Intensity.

Mostofa *et al.* (2005) ศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำมาตรฐาน Suwannee River Fulvic Acid (SRFA) Suwannee River Humic Acid (SRHA) ของ International Humic Substances Society, USA (IHSS) และสารมาตรฐาน Tryptophan โดยใช้เทคนิค FEEM spectroscopy และพบว่าตำแหน่งของพีคที่ปรากฏบนฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัมของสารมาตรฐาน SRFA SRHA และ Tryptophan แตกต่างกัน โดยมีตำแหน่งของพีคที่ ex./em. 333±3/469±6 330±13/484±13 และ 278±3/354±2 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งคล้ายคลึงกับ

รายงานของ Chen *et al.* (2003) ที่ได้ศึกษาคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำของตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่างๆ และแบ่งกลุ่มของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่ตรวจวัดโดยใช้เทคนิค FEEM spectroscopy ออกเป็น 5 กลุ่ม ตามตำแหน่งของพีคที่ปรากฏบนฟลูออเรสเซนส์สเปกตรัม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 Aromatic protein I กลุ่มที่ 2 Aromatic protein II กลุ่มที่ 3 Fulvic acid-like กลุ่มที่ 4 Soluble microbial byproduct-like และกลุ่มที่ 5 Humic acid-like และเมื่อนำรายงานการศึกษาของ Chen *et al.* (2003) เปรียบเทียบกับผลจากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานี MK2 มีสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์อยู่ในกลุ่มที่ 2 และ 4 ซึ่งเป็นสารกลุ่ม simple aromatic proteins และ soluble microbial byproduct-like ในขณะที่ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานี MK7 มีสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์อยู่ในกลุ่มที่ 2 4 และ 5 ซึ่งเป็นสารกลุ่ม simple aromatic proteins สารกลุ่ม soluble microbial byproduct-like และสารกลุ่ม Humic acid-like สำหรับตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานีอื่นๆ มีสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์อยู่ในกลุ่มที่ 5 ซึ่งเป็นสารกลุ่ม Humic acid-like เป็นองค์ประกอบ โดยมีรายละเอียดตาม Figure 3 ซึ่งการตรวจพบสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ต่างๆ ในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากแม่น้ำแม่กลองในครั้งนี้สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Hudson *et al.* (2007) ที่กล่าวว่าสารอินทรีย์ละลายน้ำที่พบได้ในแหล่งน้ำแบ่งออกได้ เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มสารประกอบคล้าย Humic (Humic-like compound) ซึ่งประกอบด้วยสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนต์คล้ายฮิวมิคและฟลูวิคและกลุ่มสารประกอบคล้ายโปรตีน (Protein-like compound) ได้แก่สารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนต์คล้าย Tyrosine และ Tryptophan

Figure 3 3D-EEM fluorescence spectrum of water samples from MK2 and MK7 and five EEM regions



according to Chen *et al*. (2003). Group 1 and 2 are Aromatic protein I and II respectively. Group 3 is Fulvic acid-like. Group 4 is Soluble microbial byproduct-like. Group 5 is Humic acid-like.

การตรวจพบสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ในกลุ่มที่ 2 และ 4 ซึ่งเป็นสารกลุ่ม simple aromatic proteins และสารกลุ่ม soluble microbial byproduct-like ในตัวอย่างน้ำในบริเวณสถานี MK2 ซึ่งตามรายงานการศึกษาของ Chen *et al*. (2003) และ Hong *et al*. (2005) ระบุว่ามีการพบสารดังกล่าวในแหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสียที่ระบายจากแหล่งชุมชนนั้น สอดคล้องกับฐานข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดินปี พ.ศ. 2555 ที่ระบุว่าบริเวณดังกล่าวมีการใช้ประโยชน์ที่ดินส่วนใหญ่เป็นแหล่งชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรม (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) เช่นเดียวกับการพบสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ในกลุ่มที่ 5 ซึ่งเป็นสารกลุ่ม Humic acid-like ในตัวอย่างน้ำตลอดลำน้ำแม่กลอง ซึ่ง Hudson *et al.* (2007) ระบุว่าสารดังกล่าวมีที่มาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งบนพื้นดินและแหล่งน้ำ สอดคล้องกับฐานข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ระบุว่ามีการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตรในจังหวัดสมุทรสงคราม ร้อยละ 68.76 และจังหวัดราชบุรี ร้อยละ 50.80 และยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ สุภกิจ และคณะ (2555) ที่ศึกษาความผันแปรของสารอินทรีย์ละลายน้ำและคุณสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแม่น้ำท่าจีน และตรวจพบสารที่มีคุณสมบัติคล้าย Humic และ Fulvic ได้ตลอดลำน้ำท่าจีน อย่างไรก็ตามการตรวจพบสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์ในกลุ่มที่ 2 และ 4 ในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานี MK7 ซึ่งเป็นบริเวณที่ห่างไกลจากแหล่งชุมชน และโรงงานอุตสาหกรรม และมีการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตรอาจเป็นผลส่วนหนึ่งมาจากอิทธิพลของแพลงก์ตอนพืชที่มีอยู่มากในบริเวณนั้น เนื่องจากผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำพบว่าปริมาณคลอโรฟิลด์-เอ ในบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 18.04 ไมโครกรัม/ลิตร (Figure 4) ซึ่ง Suksomjit *et al*. (2009) รายงานว่าแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำมีบทบาทสำคัญต่อปริมาณของสารอินทรีย์ละลายน้ำ โดยสามารถตรวจพบสารอินทรีย์ละลายน้ำในกลุ่ม Protein-like substance ในช่วงที่เกิดการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืช และอีกส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมากจากการที่แบคทีเรียในน้ำย่อยสลายแพลงก์ตอนพืชที่ตายและได้ผลผลิตเป็นสารกลุ่ม soluble microbial byproduct-like

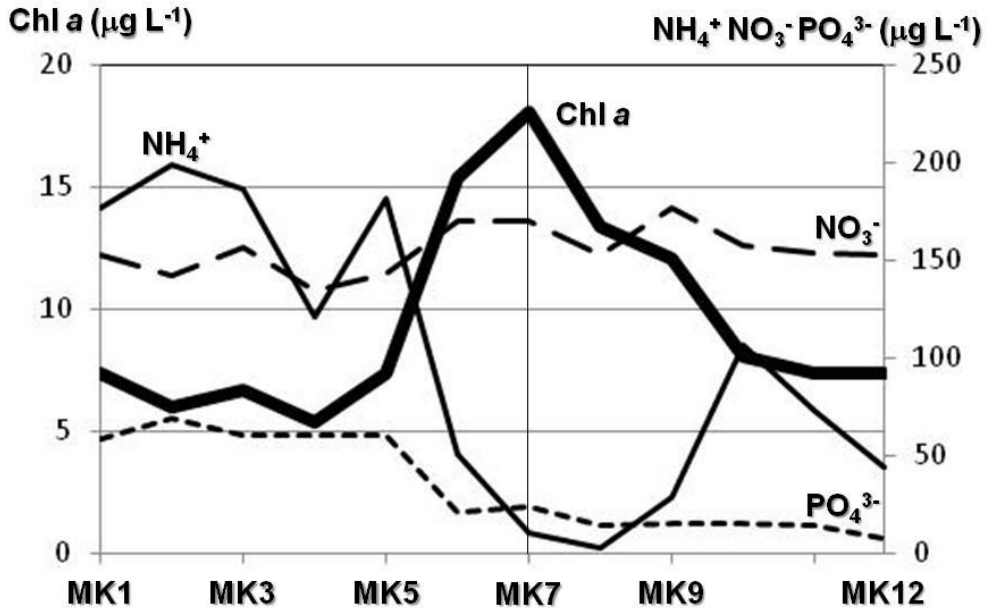


Figure 4 Chlorophyll a concentration and other water quality parameters of water samples from MK1- MK12.

สรุป

ผลการศึกษาในครั้งนี้ทำให้เข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแม่น้ำแม่กลอง โดยสารอินทรีย์ละลายน้ำในตัวอย่างที่เก็บจากสถานีต่างๆ มีคุณลักษณะใกล้เคียงกันโดยมีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์คล้าย Humic เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีที่มาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งบนพื้นดินและแหล่งน้ำ ยกเว้นในบริเวณสถานี MK2 ที่พบสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์คล้ายสารกลุ่ม simple aromatic proteins และสารกลุ่ม soluble microbial byproduct-like เป็นองค์ประกอบซึ่งมีที่มาจากการระบายน้ำเสียจากแหล่งชุมชนลงแหล่งน้ำ อย่างไรก็ตามการพบสารที่มีคุณลักษณะฟลูออเรสเซนส์คล้ายสารกลุ่ม simple aromatic proteins และสารกลุ่ม soluble microbial byproduct-like เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากสถานี MK7 อาจเป็นผลมาจากอิทธิพลจากแพลงก์ตอนพืชที่มีอยู่มากในบริเวณนั้น จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการระบายน้ำเสียจากบ้านเรือนและแพลงก์ตอนพืชมีบทบาทสำคัญต่อคุณลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่พบในแม่น้ำแม่กลอง

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2558. **สภาพการใช้ที่ดินภาคกลาง**. แหล่งที่มา: http://www.ldd.go.th/web_OLP/report_research_C.html, 15 ตุลาคม 2558.

สุภกิจ จิ๋วเจริญ, อัจฉราพร ขำโสภา, จำลอง อรุณเลิศอารีย์ และ จารุวรรณ วงค์ทะเนตร. 2555. ความผันแปรของสารอินทรีย์ ละลายน้ำและคุณสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ของสารอินทรีย์ละลายน้ำในแม่น้ำท่าจีน, น. 23-33. *ใน* **เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการสิ่งแวดล้อมนเรศวร ครั้งที่ 8**. มหาวิทยาลัยนเรศวรม จังหวัดพิษณุโลก.

Anderson, D. M., J. M. Burkholder, W. P. Cochlan, P. M. Glibert, C. J. Gobler, C. A. Heil, R. M. Kudela, M. L. Parsons, J. E. J. Rensel, D. W. Townsend, V. L. Trainer, and G. A. Vargo. 2008. Harmful algal blooms and eutrophication: Examining linkages from selected coastal regions of the United States. **Harmful Algae** 8: 39–53.

Baker, A. 2002a. Fluorescence properties of some farm wastes: implications for water quality monitoring. **Water Research** 36: 189–195.

_____. 2002b. Fluorescence Excitation-Emission Matrix Characterization of River Waters Impacted by a Tissue Mill Effluent. **Environmental Science and Technology** 36: 1377-1382.

Chen W., P. Westerhoff, J. A. Leenheer and K. Booksh. 2003. Fluorescence Excitation-Emission Matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. **Environmental Science and Technology** 37: 5701-5710.

Coble, P. G., C. E. D. Castillo and B. Avril. 1998. Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 Southwest Monsoon. **Deep-Sea Research II** 45: 2195–2223.

Fellman J. B., E. Hood and R. G. M. Spencer. 2010. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review. **Limnology and Oceanography** 55: 2452-2462.

Hong H., J. Wu, S. Shang and C. Hu. 2005. Absorption and fluorescence of chromophoric dissolved organic matter in the Perl River Estuary, South China. **Marine Chemistry** 97: 78-89.

Hudson, N., A. Baker and D. Reynolds. 2007. Fluorescence analysis of dissolved organic matter in natural, waste and polluted waters—a review. **River Research Application** 23: 631–649.

Mostofa, K. M. G., Y. Honda and H. Sakugawa. 2005. Dynamics and optical nature of Fluorescent dissolved organic matter in river waters in Hiroshima Prefecture, Japan. **Geochemical Journal** 39: 257-271.

Nagao, S., Y. Suzuki, Y. Nakaguchi, M. Senoo and K. Hiraki. 1997. Direct measurement of the fluorescence characteristics of aquatic humic substances by a three-dimensional fluorescence spectrometer. **Bunseki Kagaku** 46: 335–342.

_____,T. Matsunaga, Y. Suzuki, T. Ueno and H. Amano. 2003. Characteristics of humic substances in the Kuji River waters as determined by high-performance size exclusion chromatography with fluorescence detection. **Water Research** 37: 4159–4170.

Ogawa, H. and E. Tanoue. 2003, Dissolved Organic Matter in Oceanic Waters. **Journal of Oceanography** 59: 129-147.

Sasaki, H.,T. Miyamura, S. Saitoh and J. Ishizaka. 2005. Seasonal variation of absorption of particles and colored dissolved organic matter (CDOM) in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 64: 447–458.

Stedmon, C. A. and S. Markager. 2005. Tracing the production and degradation of autochthonous fractions of dissolved organic matter by fluorescence analysis. **Limnology and Oceanography** 50: 1415–1426.

Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons. 1972. **A practical hand book of seawater analysis (2nd Ed'n)**. Fisheries Research Board Canada Bulletin 167, 311 pp.

Suksomjit, M., S. Nagao, K. Ichimi, T. Yamada and K. Tada. 2009. Variation of Dissolved Organic Matter and Fluorescence Characteristics before, during and after Phytoplankton Bloom. **Journal of Oceanography** 65: 835-846.

น้ำหมักชีวภาพน้ำเค็มโดยแบคทีเรียทะเล

Effective Microorganism Solution in Sea Water by Marine Bacterium

พัฒนา ภูลเปี่ยม*

Pattana POONPIUM*

บทคัดย่อ

แบคทีเรียทะเล 5 สายพันธุ์ คัดเลือกจากดินตะกอนบริเวณสะพานปลาอ่างศิลา จังหวัดชลบุรี สามารถเจริญได้ในสารละลายกากน้ำตาลที่ความเค็ม 30 ส่วนในพันส่วนโดยน้ำทะเล ไม่เจริญบนอาหาร TCBS agar และสามารถย่อยสลายน้ำมันถั่วเหลืองได้ เมื่อเติมแบคทีเรียที่คัดแยกได้ลงในสารละลายกากน้ำตาลเพื่อทำการหมักน้ำชีวภาพ ในช่วงแรกความหนาแน่นของแบคทีเรียมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และเริ่มคงตัวช่วงสัปดาห์ที่ 10-19 เท่ากับ $1.74x10^6$-$1.81x10^6$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร พบกรดแลคติกเข้มข้นระหว่าง 5-34 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ค่า pH เท่ากับ 4.7 เมื่อสิ้นสุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 25 ผลิตแก๊สในช่วงสัปดาห์ที่ 2-12 ของการทดลอง เมื่อเติมน้ำหมักชีวภาพที่มีอายุการหมัก 9 สัปดาห์ 1 ต่อ 10 ส่วน ลงในอาหาร Yeast extract-peptone broth ที่เติมน้ำมันถั่วเหลือง บ่มที่ 35 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที เริ่มพบการย่อยสลายของน้ำมันถั่วเหลืองที่เวลา 24 ชั่วโมง และย่อยละลายหมดใน 11 วันของการทดลอง

ABSTRACT

Selection of the marine bacteria 5 strain from Ang Sila jetty sediment: Chonburi province, That were grow in molasses solution at salinity of seawater 30 ppt, non-grow on TCBS agar and soybean oil digestion. When add selective bacteria into molasses solution for effective microorganism solution production. Bacterial density increased in the Initial phase and steady phase at 10-19 weeks were $1.74x10^6$-$1.81x10^6$ CFU/mL Lactic acid concentration were 5-34 mg/mL. pH were 4.7 at end of treatment in 25 weeks. Gas produced at 2-12 week of treatment. When add the 9 weeks effective microorganism solution 1/10 to Yeast extract-peptone broth combine with soybean oil. Incubate at 35 °C and 20 rpm by shaker. Soybean oil were initial digestion at 24 hours and completely digestion in 11 days of treatment.

Key Words: effective microorganism solution, Biofertilizer, Marine bacterium

*Corresponding author; e-mail address: **pattana@buu.ac.th**

สถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา บางแสน จังหวัดชลบุรี 20131

Institute of Marine Science, Burapha University, Bangsaen, Chonburi 20131

บทนำ

สภาพระบบนิเวศชายฝั่งทะเลในปัจจุบันพบว่ามีสภาพเลื่อมโทรมลงอย่างมาก จากการปนเปื้อนของเสียจากแหล่งต่างๆ ที่ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งทะเล มาตรการควบคุมและป้องกันในด้านต่างๆ อาจไม่เพียงพอ จำเป็นอย่างยิ่งที่ควรจะมีมาตรการหรือวิธีการเพื่อฟื้นฟูระบบนิเวศบริเวณชายฝั่งทะเล วิธีการทางชีวภาพในปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาใช้ในการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจาก ต้นทุนต่ำ อุปกรณ์หาได้ไม่ยาก วิธีการและขั้นตอนกระทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน น้ำหมักชีวภาพ หรือน้ำ EM (Effective Microorganisms) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่กำลังได้รับความนิยม ในการใช้วัสดุหรือผลผลิตจากธรรมชาติในการแก้ปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อม สามารถใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตสบู่เหลว น้ำยาสระผม น้ำยาทำความสะอาดพื้นผิวห้องน้ำและสุขภัณฑ์ (ไชยวัฒน์, 2550) ลดการใช้สารเคมีซึ่งจะตกค้างและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในส่วนอื่นต่อไป แต่เนื่องจากน้ำหมักชีวภาพที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นการหมักในสภาวะน้ำจืด จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ในน้ำหมักเป็นกลุ่มที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะน้ำจืด แต่สำหรับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับน้ำทะเล เช่น การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม การทำความสะอาดพื้นผิวบริเวณท่าเทียบเรือและสะพานปลา เป็นต้น อาจไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะจุลินทรีย์และเอนไซม์ที่ผลิตขึ้น อาจถูกยับยั้งการเจริญเติบโตและกิจกรรมเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเค็ม เมื่อนำไปใช้ในระบบนิเวศชายฝั่งทะเลจะมีลักษณะเป็นเพียงอินทรีย์สารปนเปื้อนสู่ธรรมชาติ เป็นการเพิ่มความสกปรกให้ระบบนิเวศที่ต้องทำการต้องย่อยสลายทิ้งไปอีกด้วย แต่ถ้าหากเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถเจริญเติบได้ดีในสภาวะที่มีความเค็ม อาจเป็นแนวทางในการอนุรักษ์และฟื้นฟูสภาวะแวดล้อมชายฝั่งทะเลได้เป็นอย่างดี จุลินทรีย์และเอนไซม์สามารถเจริญเติบโตและมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายของเสียได้อย่างต่อเนื่องเมื่อสัมผัสกับของเสียที่มีความเค็ม

การศึกษาครั้งนี้ มีแนวคิดเพื่อคัดเลือกแบคทีเรียทะเลจากน้ำและดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเลในแหล่งที่มีการสะสมของเสียในปริมาณมาก เช่น สะพานปลา สถานประกอบการ โรงแรม ร้านอาหาร ชุมชนชายฝั่งทะเล ฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม เลือกชนิดแบคทีเรียที่สามารถเจริญเติบโตและมีศักยภาพในการย่อยสลายของเสียได้ดี โดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองซึ่งให้กันอยู่ในครัวเรือนเป็นตัวแทนของเสีย ไม่ก่อให้เกิดโรคกับสัตว์น้ำ เพื่อใช้เริ่มต้นในการผลิตน้ำหมักชีวภาพในสภาวะความเค็ม และทดสอบความสามารถในการย่อยสลายน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งใช้เป็นตัวแทนของเสียหลักจากครัวเรือนในสภาวะที่มีความเค็มเทียบกับน้ำหมักชีวภาพที่หมักในสภาวะน้ำจืด เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการฟื้นฟูสภาวะแวดล้อมชายฝั่งทะเลต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

คัดเลือกพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างตะกอนดิน

คัดเลือกบริเวณที่ทำการเก็บน้ำและดินตะกอนบริเวณชายฝั่งทะเลที่มีกิจกรรมหรือการสะสมของเสียในปริมาณมาก ได้แก่ สะพานปลา สถานประกอบการ โรงแรม ร้านอาหาร ชุมชนชายฝั่งทะเล ฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม

คัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีความเหมาะสมในการหมักในสภาพน้ำเค็ม

นำตะกอนดิน 38 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติกขนาด 380 มิลลิลิตร เติมสารละลายกากน้ำตาลจนได้ปริมาตรรวม 380 มิลลิลิตร (เตรียมสารละลายกากน้ำตาลปลอดเชื้อ โดยนำกากน้ำตาลเข้มข้นเจือจางด้วยน้ำทะเลที่มีความเค็ม 30 ส่วนในพันส่วน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 20) เขย่าให้เข้ากัน ตรวจนับความหนาแน่นของแบคทีเรียบนอาหาร Tryptic Soy agar : TSA (Difco Laboratories, 1997) ปิดฝาขวดให้สนิท บ่มที่อุณหภูมิห้อง

นาน 30 วัน ตรวจนับความหนาแน่นของแบคทีเรียบนอาหาร TSA (รอบที่ 1) ใช้น้ำหมักที่ตรวจพบการเจริญของแบคทีเรียเติมลงในสารละลายกากน้ำตาล อัตราส่วน 1 ต่อ 10 (รอบที่ 2) ทำการทดลองเช่นเดียวกับรอบที่ 1 ใช้น้ำหมักในรอบที่ 2 ที่ตรวจพบการเจริญของแบคทีเรียเติมลงในสารละลายกากน้ำตาล อัตราส่วน 1 ต่อ 10 (รอบที่ 3) ทำการทดลองเช่นเดียวกับรอบที่ 1 คัดเลือกโคโลนีที่มีลักษณะต่างกันของแบคทีเรียที่เจริญบนอาหาร โดยใช้เข็มเขี่ยแบคทีเรียเลี้ยงบนอาหาร TSA จนได้เชื้อแบคทีเรียบริสุทธิ์ นำแบคทีเรียบริสุทธิ์แต่ละสายพันธุ์ที่คัดแยกได้ไปเลี้ยงบนอาหาร Thiosulfate citrate bile sucrose agar : TCBS agar (Difco Laboratories, 1997; Merck Laboratory Products Division, 1996) เพื่อคัดแยกเชื้อวิบริโอ หากพบการเจริญบนอาหาร TCBS agar จะคัดออกไม่นำมาใช้ในการทดลอง

ทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายของเสีย

นำแบคทีเรียที่ได้เลี้ยงในอาหาร Yeast extract-peptone broth : YPB (Difco Laboratories, 1997) เติมน้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน บ่มที่ 35 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นเติมลงในอาหาร YPB เติมน้ำมันถั่วเหลือง ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 บ่มที่ 35 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงของชั้นน้ำมันถั่วเหลืองทุก 24 ชั่งโมง เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมแบคทีเรีย คัดเลือกแบคทีเรียของชุดทดสอบที่พบการเปลี่ยนแปลงของชั้นน้ำมันถั่วเหลืองเพื่อใช้เริ่มต้นในการทำน้ำหมักชีวภาพ

ขั้นตอนการหมักน้ำชีวภาพ

นำแบคทีเรียที่ได้เลี้ยงในอาหาร YPB เติมน้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน บ่มที่ 35 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที นาน 24 ชั่วโมง เติมลงในสารละลายกากน้ำตาล ปริมาตร 1.5 ลิตร ในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 บรรจุในขวดจนเกือบเต็ม ปิดฝาให้สนิท ทุก 7 วัน ตรวจวัดปริมาณแบคทีเรีย เพื่อตรวจหาช่วงที่แบคทีเรียมีการเพิ่มจำนวนได้ดีที่สุด (ช่วงปลายของ log phase) และตรวจวัดปริมาณกรดแลคติกในน้ำหมักตามวิธีของ Barker and Summerson (1941)

ทดสอบประสิทธิภาพ

ในขั้นตอนนี้ทำควบคู่กับน้ำหมักชีวภาพที่ทำการหมักในสภาวะน้ำจืด (ชุดควบคุม) โดยใช้หัวเชื้อที่มีจำหน่ายตามร้านเคมีการเกษตรโดยทั่วไปเป็นหัวเชื้อ โดยใช้สารละลายกากน้ำตาลความเข้มข้นและสภาวะในการหมักเช่นเดียวกับชุดทดสอบแต่ใช้น้ำจืดเป็นตัวเจือจาง ตรวจวัดความหนาแน่นของแบคทีเรียเพื่อหาช่วงที่มีความหนาแน่นสูงสุดเช่นเดียวกับชุดทดสอบ นำน้ำหมักชีวภาพทั้งสองเติมลงในอาหาร YPB (เตรียมด้วยน้ำมันถั่วเหลือง) ที่มีความเค็ม 30 ส่วนในพันส่วน ในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 ทำการสังเกตลักษณะของน้ำมันถั่วเหลือง ทุก 24 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดลองตรวจวัดความหนาแน่นของแบคทีเรียบนอาหาร TSA (ชุดทดสอบเตรียมด้วยน้ำทะเลความเค็ม 30 ส่วนในพันส่วน ชุดควบคุมเตรียมด้วยน้ำกลั่น)

ผลและวิจารณ์

เก็บตัวอย่างตะกอนดินจากบริเวณต่างๆ รวม 16 แหล่ง ได้แก่ เชิงสะพานบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา จำนวน 20 ตัวอย่าง พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี ได้แก่ ปากคลองตำหรุ ตำบลบางทราย จำนวน 30 ตัวอย่าง ฟาร์มเลี้ยงหอยแครงหน้าตัวจังหวัดชลบุรี จำนวน 20 ตัวอย่าง สะพานปลาอ่างศิลา จำนวน 20 ตัวอย่าง ฟาร์มเลี้ยงหอยแมงภู่อ่างศิลา ตำบลอ่างศิลา จำนวน 30 ตัวอย่าง แหลมแท่น จำนวน 30 ตัวอย่าง สะพานปลาหาด

วอนนภา จำนวน 20 ตัวอย่าง ปากคลองน้ำเหม็น ตำบลแสนสุข จำนวน 20 ตัวอย่าง พื้นที่อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ได้แก่ ชายฝั่งทะเลชุมชนบางพระ ตำบลบางพระ จำนวน 20 ตัวอย่าง โดยรอบเกาะลอยศรีราชา จำนวน 20 ตัวอย่าง ป่าชายเลนชุมชนบ้านแหลมฉบัง ตำบลแหลมฉบัง จำนวน 20 ตัวอย่าง พื้นที่อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ได้แก่ โบสถ์กลางน้ำวัดจิตตภาวันวิทยาลัย จำนวน 20 ตัวอย่าง ชายฝั่งพัทยาเหนือ จำนวน 20 ตัวอย่าง ชายฝั่งพัทยากลาง จำนวน 20 ตัวอย่าง ชายฝั่งพัทยาใต้ จำนวน 20 ตัวอย่าง นาจอมเทียน จำนวน 20 ตัวอย่าง

คัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีความเหมาะสมในการหมักในสภาพน้ำเค็ม

เมื่อหมักตะกอนดินในสารละลายกากน้ำตาลและต่อน้ำหมักลงสารละลายกากน้ำตาลจนครบ 3 รอบ สามารถคัดแยกแบคทีเรียจากน้ำหมักที่เตรียมจากดินตะกอนบริเวณแหลมแท่นได้ 4 สายพันธุ์ จากดินตะกอนบริเวณสะพานปลาอ่างศิลาได้ 5 สายพันธุ์ จากดินตะกอนบริเวณป่าชายเลนปากคลองน้ำเหม็นได้ 6 สายพันธุ์

เมื่อนำแบคทีเรียที่คัดแยกได้ เขี่ยบนอาหาร TCBS agar ปรากฏว่าไม่พบการเจริญบนอาหาร TCBS agar แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียดังกล่าวไม่ใช่แบคทีเรียกลุ่มวิบริโอซึ่งเป็นตัวหลักในการเกิดโรคของสัตว์น้ำเค็ม

ทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายของเสีย

เมื่อนำแบคทีเรียแต่ละตัวที่ได้ลงเลี้ยงในอาหาร YPB ที่เติมน้ำตาลกลูโคสและน้ำมันถั่วเหลืองเป็นแหล่งคาร์บอน ตามลำดับ เปรียบเทียบกับอาหาร YPB (ชุดควบคุม) ที่ไม่เติมแบคทีเรีย พบว่าในวันที่ 3 ของการทดลองชั้นน้ำมันถั่วเหลืองที่เติมแบคทีเรียที่แยกจากตะกอนดินบริเวณสะพานปลาอ่างศิลา 1 สายพันธุ์ ในทั้งหมด 5 สายพันธุ์ มีการกระจายตัวเป็นปุยขาวด้านล่างของชั้นน้ำมันพืช มีลักษณะฟูมากขึ้นในวันต่อๆ มา ในวันที่ 7 ของการทดลองเริ่มสังเกตุเพบชิ้นของปุยสีขาวเล็กๆ หลุดลอยอยู่ในชั้นน้ำของอาหารเลี้ยงเชื้อ ทำให้มีลักษณะขาวขุ่นมากขึ้นตามลำดับ (Figure 1) ส่วนชุดควบคุมไม่พบการเปลี่ยนแปลงของชั้นน้ำมันถั่วเหลือง



Control Treatment

Figure 1 Soybean oil digestion by marine bacteria.

ขั้นตอนการหมักน้ำชีวภาพ

เมื่อนำแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายน้ำมันถั่วเหลืองได้ ลงเลี้ยงในอาหาร YPB เติมน้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน และเติมลงในสารละลายกากน้ำตาล เมื่อตรวจวัดความหนาแน่นของแบคทีเรียทุก 7 วัน พบว่าความหนาแน่นของแบคทีเรียมีแนวโน้มลดลงจนไม่สามารถตรวจพบได้ในสัปดาห์ที่ 5 ไม่ผลิตแก๊สในระหว่างหมัก

อาจเพราะการเจริญในสารละลายกากน้ำตาล ต้องมีย่อยสลายและผลิตสารต่างๆ ส่งต่อกันระหว่างจุลินทรีย์ที่เจริญในน้ำหมัก ซึ่งปกติในน้ำหมักชีวภาพจะสามารถตรวจพบจุลินทรีย์หลายชนิดร่วมกันทั้งแบคทีเรียและยีสต์ (สิทธิชัย, 2541) ดังนั้นจึงพิจารณาหมักสารละลายกากน้ำตาลโดยใช้แบคทีเรียที่ย่อยสลายน้ำมันถั่วเหลืองร่วมกับแบคทีเรียอื่นที่คัดเลือกได้จากตะกอนดินแหล่งเดียวกันเป็นหัวเชื้อเติมลงในสารละลายกากน้ำตาล พบว่าความหนาแน่นของแบคทีเรียมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตลอดช่วงระยะเวลา 10 สัปดาห์ของการหมัก เริ่มคงตัวจากสัปดาห์ที่ 10-19 ของการหมัก ในช่วง $1.74x10^{6}$-$1.81x10^{6}$ โคโลนีต่อมิลลิลิตร สัปดาห์ที่ 20-25 เริ่มลดลงตามลำดับ (figure 2) ค่า pH ของน้ำหมักลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดช่วง 16 สัปดาห์แรกของการหมักเท่ากับ 3.2±0.02 จากนั้นเพิ่มสูงขึ้นจนสิ้นสุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 25 เท่ากับ 4.7±0.01 ตรวจพบปริมาณกรดแลคติกในน้ำหมักเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดช่วงการทดลอง ระหว่าง 5 ถึง 3.4 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (figure 3) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับค่า pH ที่ลดลงในช่วง 16 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นค่า pH มีแนวโน้มกลับสูงขึ้นจนสิ้นสุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 25 ขณะที่ปริมาณกรดแลคติกยังเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะในการหมักจะมีการผลิตสารประกอบและกรดตัวอื่นด้วย เช่น ฟีนอลิก กรดอินทรีย์ และแอลกอฮอล (สมหมาย, 2551) ค่า pH มีค่าลดลงในช่วง 16 สัปดาห์แรกจึงเป็นผลจากกรดโดยรวมในน้ำหมัก หลังจากนั้นถึงจะมีการสะสมกรดแลคติกเพิ่มขึ้นในน้ำหมัก แต่กรดอินทรีย์ตัวอื่นมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นแอลกอฮอร์หรือสารอื่นโดยแบคทีเรียที่เจริญร่วมกันในน้ำหมัก (พิมพร, 2557) ทำให้ปริมาณกรดโดยรวมลดลงจึงทำให้ค่า pH ของน้ำหมักมีแนวโน้มกลับสูงขึ้น

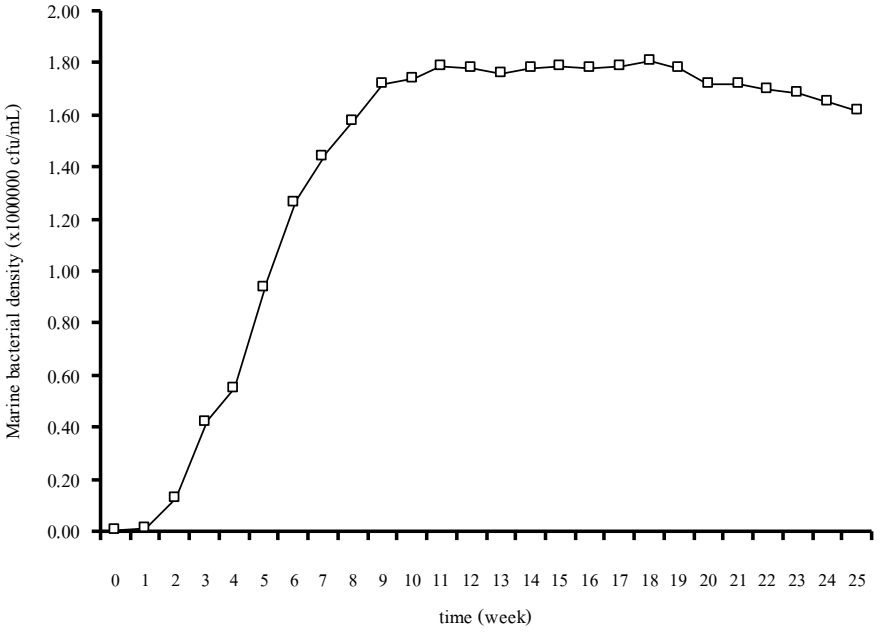


Figure 2 Marine bacterial density of Effective Microorganism Solution

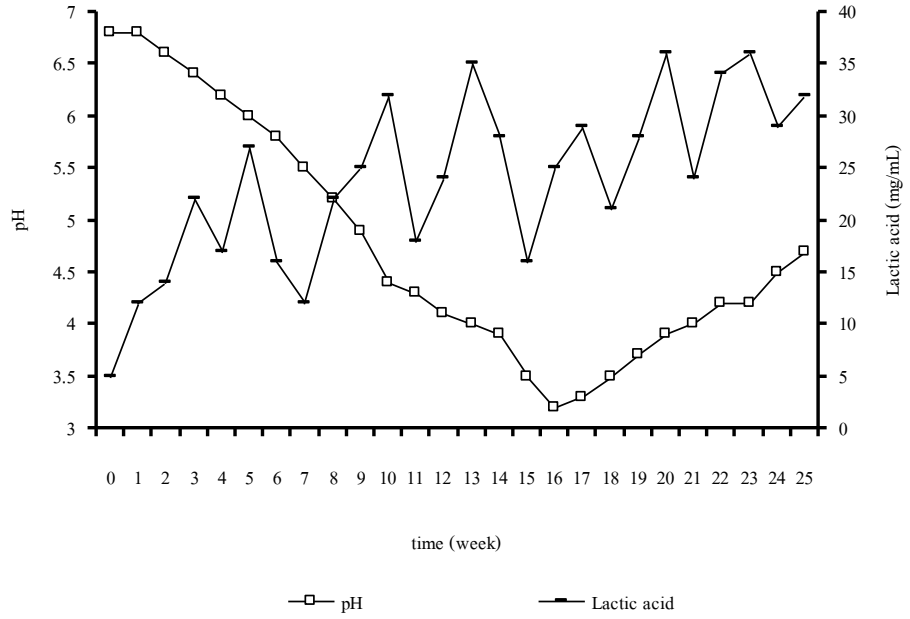


Figure 3 pH and Lactic acid of Effective Microorganism Solution

ทดสอบประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพ

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันถั่วเหลืองในสภาวะที่มีความเค็มของน้ำหมักชีวภาพที่อายุการหมัก 9 สัปดาห์ (ชุดทดสอบ) และชุดควบคุม คือ น้ำหมักชีวภาพที่หมักในสภาพน้ำจืดที่อายุการหมัก 3 สัปดาห์ ในอาหาร YPB พบว่าชั้นน้ำมันถั่วเหลืองของชุดทดสอบเริ่มมีการกระจายตัวเป็นปุยสีขาวเมื่อครบ 24 ชั่วโมง และละลายปนกับชั้นน้ำหมดภายใน 11 วัน มีความหนาแน่นของแบคทีเรียในช่วง 1.25×10^4 – 1.55×10^5 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และพบว่าสีขาวขุ่นของอาหารลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อทิ้งไว้นาน 30 วัน ส่วนชุดของน้ำหมักชีวภาพน้ำจืดพบการกระจายตัวด้านล่างของชั้นน้ำมันถั่วเหลืองที่เวลา 24 ชั่วโมงเช่นกัน แต่เป็นเพียงชั้นสีขาวบางๆ เท่านั้น จากนั้นไม่พบการเปลี่ยนแปลงและกระจายตัวปนในชั้นน้ำ เมื่อสิ้นสุดการทดลองไม่พบการเจริญของแบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อ

สรุป

แบคทีเรียทะเลที่คัดเลือกได้จากตะกอนดินบริเวณสะพานปลาอ่างศิลาสามารถเจริญเติบโตได้ในสารละลายกากน้ำตาลและมีศักยภาพในการย่อยสลายน้ำมันถั่วเหลือง มีความเหมาะสมในการใช้เริ่มต้นหมักน้ำชีวภาพในสภาวะความเค็มร่วมกับแบคทีเรียตัวอื่นที่คัดเลือกได้จากแหล่งเดียวกัน น้ำหมักชีวภาพที่ได้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งใช้เป็นตัวแทนของเสียได้เป็นอย่างดี หากนำไปใช้งานจริงน่าจะสามารถย่อยสลายของเสียซึ่งมีโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากของเสียจากครัวเรือนส่วนใหญ่จะมีส่วนของน้ำมันและไขมันปะปนออกมาด้วย ความคงทนของแบคทีเรียในน้ำหมักมากกว่าแบคทีเรียในน้ำหมักชีวภาพที่หมักในสภาวะน้ำจืดเมื่อนำไปใช้ในกิจกรรมหรือสภาวะที่มีความเค็ม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท อี เอ็ม คิวเซ จำกัด ให้ความอนุเคราะห์หัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับหมักน้ำชีวภาพในสภาพน้ำจืด ขอขอบคุณสถาบันวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา ที่อนุเคราะห์สถานที่ทำวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

ไชยวัฒน์ ไชยสุต. 2550. **น้ำหมักชีวภาพเทคโนโลยีเพื่อความพอเพียง**. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

พิมพร ลีลาพรพิสิฐ. 2557. **เครื่องสำอางจากน้ำหมักชีวภาพ**. คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมหมาย ปัตตาลี. 2551. **การศึกษาคุณภาพของน้ำหมักชีวภาพที่ผลิตจากผลมะหลอด**. สารนิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

สิทธิชัย ธีระสุนทรไท. 2541. **การศึกษาจุลินทรีย์ในน้ำหมักชีวภาพและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย**. โครงงานวิทยาศาสตร์ โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว.

Barker, S. B. and W. H. Summerson. 1941. The Colorimetric Determination of Lactic Acid in Biological Material. **Journal of Biological Chemistry** 178 (2): 535-554.

Merck Laboratory Products Division. 1996. **Merck microbiology manual**. Germany.

Difco Laboratories. 1997. **The Difco manual**, Michigan. USA.

ประสิทธิภาพของระบบจุลินทรีย์ยึดเกาะโดยใช้เปลือกหอยนางรมเป็นตัวกลาง ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน

Efficiency of Attached - Growth System using Oyster Shell as Media for Domestic Wastewater

ปัณณวัฒน์ สุขประเสริฐ ภาคิณ วันชัยชนะ เอกวิริยะ ชุมภู เอมอร ประจวบมอญ และ รตีวรรณ สุวัฒนมาลา*

Pannawat Sukprasert , Pakin Wonchaichana , Ekwiriya Chumpoo , Aimorn Prachuabmorn and Ratiwun Suwattanamala*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียชุมชนด้วยระบบจุลินทรีย์ยึดเกาะที่มีเปลือกหอยนางรมเป็นตัวกลาง โดยมีอัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุกแปรเปลี่ยน การทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ แบ่งเป็น 3 ชุดตามอัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก ได้แก่ 0.50 กก.บีโอดี/ม^3/วัน 0.75 กก.บีโอดี/ม^3/วัน และ 1.00 กก.บีโอดี/ม^3/วัน น้ำเสียที่ป้อนเข้าถังปฏิกิริยาเป็นน้ำเสียชุมชนความเข้มข้นต่ำ มีค่าพีเอช 7.01-7.34 บีโอดี 102.00 -144.30 มก./ล.และของแข็งแขวนลอย 23.33 - 66.67 มก./ล. ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีเฉลี่ย 86.72 $\pm$ 2.42 % 85.15 $\pm$ 3.06 % และ 79.78 $\pm$ 4.04 % ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 80.13 $\pm$ 8.08 % 67.03 $\pm$ 8.74 % และ 46.04 $\pm$ 14.85 % เมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุกมีค่า 0.50 กก.บีโอดี/ม^3/วัน 0.75 กก.บีโอดี/ม^3/วัน และ 1กก.บีโอดี/ม^3/วัน ตามลำดับ จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเปลือกหอยนางรมสามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบจุลินทรีย์ยึดเกาะ เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบได้ อัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุกที่เหมาะสมคือ 0.50 กก.บีโอดี/ม^3/วัน และ0.75 กก.บีโอดี/ม^3/วัน

ABSTRACT

The objective of this study was to access the efficiency of BOD and SS removal from domestic wastewater by attached growth system using oyster shell as media through the variable organic loading rates. The lab - scale experiment was performed at 3 different organic loading rates at 0.50, 0.75, and 1.00 kg BOD/m^3/d. Low strength domestic wastewater was fed into the reactor. Range of pH , BOD,SS in the influent was 7.01-7.34 , 102.0 -144.3 mg/l, and 23.33 - 66.67 mg/l, respectively. The results showed that BOD removal of 86.72 $\pm$ 2.42 %, 85.15 $\pm$ 3.06 %,and 79.78 $\pm$ 4.04 %, while the SS removal of 80.13 $\pm$ 8.08 %,67.03 $\pm$ 8.74 % , and 46.04 $\pm$ 14.85 % when organic loading rate was at 0.5, 0.75, and1 kg BOD/m^3/d, respectively. This study suggests that oyster shell could be used as media of attached growth system for treating organic wastewater. The recommended organic loading rates were at 0.50 and 0.75 kg BOD/m^3/d.

Key Words: wastewater, treatment, attached growth, oyster shell

* Corresponding author; e-mail address: ratiwun@buu.ac.th

ภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

Department of Environmental Health, Faculty of Public Health, Burapha University, Chonburi 20131

คำนำ

การบำบัดน้ำเสียชุมชนนิยมใช้ระบบบำบัดแบบชีวภาพ เนื่องจากในน้ำเสียชุมชนมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบสำคัญ (Metcalf and Eddy, 1981) จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบจุลินทรีย์ยึดเกาะ (attached growth system) เป็นระบบหนึ่งที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์สูง มีความยืดหยุ่นและประหยัดพื้นที่ ดูแลและบำรุงรักษาง่าย (เกรียงศักดิ์ 2547; Qiu *et al*., 2007) โดยเฉพาะระบบจุลินทรีย์ยึดเกาะชนิดตัวกลางจมน้ำ (submerged attached growth system) จะมีปริมาณชีวมวล (biomass) สูงกว่าระบบจุลินทรีย์แขวนลอย (suspended growth system) และระบบจุลินทรีย์ยึดเกาะชนิดอื่นๆ (Pedro and Dobie, 2006) จึงสร้างถังปฏิกิริยาให้มีขนาดเล็กลงได้ สำหรับวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์ยึดเกาะ ควรทำจากวัสดุที่คงทน ย่อยสลายยาก ไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ เปลือกหอยนางรมเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีลักษณะเหมาะต่อการนำมาใช้เป็นตัวกลาง มีความพรุนสูงและพื้นผิวจำเพาะมาก (Luo *et al*., 2013) พื้นผิวขรุขระเหมาะต่อการยึดเกาะของจุลินทรีย์ น้ำหนักเบา รูปร่างไม่แน่นอน เมื่อนำมาจัดวางลงในถังปฏิกิริยาของระบบบำบัดจึงมีช่องว่าง (void volume)มาก ซึ่งจะช่วยป้องกันการอุดตันในระบบ ขณะนี้การนำเปลือกหอยนางรมมาใช้ประโยชน์ยังมีน้อย มักพบเห็นทิ้งอยู่ทั่วไปในพื้นที่ทำฟาร์มหอยนางรม ก่อปัญหาเหตุรำคาญส่งกลิ่นเหม็นรบกวน เมื่อนำไปฝังกลบจะกินพื้นที่ในหลุมฝังกลบขยะ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบจุลินทรีย์ยึดเกาะที่มีเปลือกหอยนางรมเป็นตัวกลาง เพื่อเป็นแนวทางในการนำเปลือกหอยนางรมมาใช้ประโยชน์ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ระบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

ระบบบำบัดน้ำเสียจำลองระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย ถังกักเก็บน้ำเสีย (sump tank) ความจุ 100 ลิตร ถังรวบรวมน้ำเสีย (storage tank) ความจุ 40 ลิตร เพื่อกระจายน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยา ทั้ง 3 ชุด ถังปฏิกิริยา (reactor) มีขนาดความจุของการทำงานจริง (working volume) 5 ลิตร และถังตกตะกอน (sedimentation tank) ความจุ 2 ลิตร ดังแสดงใน Figure 1 ภายในถังปฏิกิริยาบรรจุตัวกลางเปลือกหอยนางรมปากจีบที่ผ่านการเพาะเลี้ยงฟิล์มจุลินทรีย์แล้ว ปริมาตรตัวกลาง 4.7 ลิตร ปริมาตรช่องว่าง (void volume) 6 % ตัวกลางจมอยู่ใต้น้ำ ดังแสดงใน Figure 2 เติมอากาศผ่านหัวจ่ายอากาศชนิดหัวทราย ควบคุมให้ถังปฏิกิริยามีออกซิเจนละลายประมาณ 2 มก./ล. เพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ (เกรียงศักดิ์, 2547) น้ำทิ้งจากถังปฏิกิริยาไหลสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนออกจากน้ำทิ้ง ไม่มีการหมุนเวียนกลับเข้าระบบ รายละเอียดของถังปฏิกิริยาบรรจุตัวกลาง ดังแสดงใน Table1 ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง คือ เปลือกหอยนางรมปากจีบ (*Saccostrea commercialis*) ซึ่งเป็นหอยนางรมขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 6 เซนติเมตร คัดเลือกให้มีขนาดใกล้เคียงกัน ล้างทำความสะอาดและแช่น้ำจนความเค็มลดลงเป็น 0 มก./ล. อบแห้งเพื่อฆ่าเชื้อ ก่อนนำไปเพาะเลี้ยงฟิล์มจุลินทรีย์ต่อไป โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

การเพาะเลี้ยงฟิล์มจุลินทรีย์

นำตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา มาเป็นหัวเชื้อ โดยทำการเพาะเลี้ยงในถังน้ำเสียที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา แช่เปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเตรียมมาแล้วลงในถังน้ำเสีย เปลี่ยนถ่ายน้ำเสียใหม่ทุกวัน โดยใช้น้ำเสียจากอาคารคณะสาธารณสุขศาสตร์ มาป้อนเข้า

ถัง เพาะเลี้ยงจนกว่าจะสังเกตเห็นฟิล์มจุลินทรีย์เกาะบนตัวกลาง ใช้เวลาประมาณ 12 วัน ทำการเพาะเลี้ยงต่อไปจนเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) จึงนำมาใช้เป็นตัวกลางในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ทดลอง

ใช้น้ำเสียชุมชน เก็บรวบรวมจากบ่อพักน้ำเสียคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา กรองผ่านตะแกรง ขนาดช่องตะแกรง 0.3 ซม. เพื่อกำจัดเศษผงสิ่งสกปรกที่อาจอุดตันระบบ แบ่งตัวอย่างน้ำเพื่อส่งวิเคราะห์พีเอช บีโอดี ซีโอดีและของแข็งแขวนลอย เพื่อหาลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนทดลอง

การเดินระบบ

การศึกษาครั้งนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (lab scale)แบ่งการทดลองเป็น 3 ชุด ได้แก่

ชุดที่ 1 อัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก 0.5 กก.บีโอดี/ม.^{3}/วัน

ชุดที่ 2 อัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก 0.75 กก.บีโอดี/ม.^{3}/วัน

ชุดที่ 3 อัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก 1 กก.บีโอดี/ม.^{3}/วัน

ป้อนน้ำเสียเข้าระบบโดยปรับอัตราการไหลตามอัตราส่วนของบีโอดี ดังนั้นเพื่อความรวดเร็วในการนำข้อมูลมาใช้ปรับอัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก ขั้นตอนนี้จึงใช้การประมาณค่าบีโอดีจากค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้ เก็บตัวอย่างน้ำก่อนและหลังการบำบัด เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ เมื่อสิ้นสุดการทดลองทำการวิเคราะห์น้ำหนักแห้งของจุลินทรีย์ยึดเกาะที่เกิดบนตัวกลาง วิเคราะห์ในรูปของMixed liquor suspended solid;MLSS (อรุณวรรณ และนุกูล, 2538)

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ตรวจวัดพีเอชด้วย pH meter (Handy lab pH11/set, SCHOTT ,Germany) ออกซิเจนละลายด้วย DO meter (Handy lab OX12/set, SCHOTT ,Germany) วิเคราะห์บีโอดี ซีโอดีและของแข็งแขวนลอยตามวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005)

Table1 Characteristics of media tank.

Parameters	characteristics
Media size (cm)	6
Fluid volume (l)	5
Media volume (l)	4.7
Void volume %	6

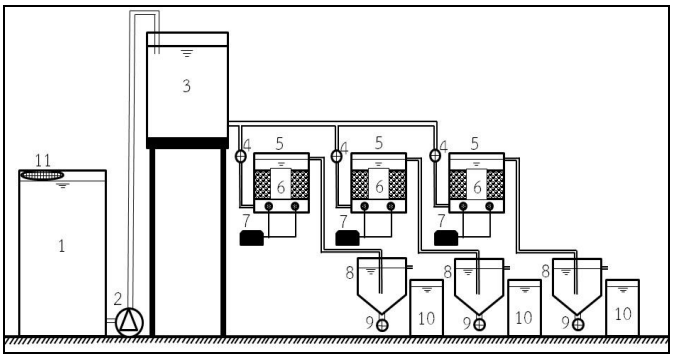


Figure 1 Experimental aerobic submerged attached growth system ; (1): sump tank; (2):pump; (3):storage tank; (4):valve; (5):reactor; (6):media;(7): air pump(8):sedimentation tank; (9):valve of sludge drain; (10):effluent sump tank ;(11):screen.



Figure 2 Photograph of oyster shell media.

ผลและวิจารณ์

ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริง จัดเป็นน้ำเสียชุมชนความเข้มข้นต่ำ(Metcalf and Eddy, 1981) สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบใช้อากาศ ลักษณะสมบัติของน้ำเสียแสดงในTable 2 มีค่าพีเอช 7.01-7.34 ซึ่งอยู่ในช่วง 6.50-7.50 จึงเหมาะต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยเฉพาะกลุ่มแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (David and Bela, 2000) ก่อนนำมาทดลองได้กรองผ่านตะแกรง เพื่อดักเศษขยะต่างๆ ออกไป เพื่อป้องกันการสิ่งสกปรกอุดตันในชั้นตัวกลางและป้องกันการเกิดแรงเฉือนซึ่งอาจทำให้ฟิล์มจุลินทรีย์หลุดลอกจากผิวตัวกลางได้ (เกรียงศักดิ์, 2547)

ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี

ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก 0.50 กก.บีโอดี/ม^3/วัน 0.75 กก.บีโอดี/ม^3/วัน และ 1.00 กก.บีโอดี/ม.^{3}/วัน คุณภาพน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าบีโอดีเฉลี่ย 16.27±3.26 มก./ล.19.32±3.60 มก./ล.และ 24.58±4.28 มก./ล.คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี 86.72±2.42%, 84.15±3.06% และ 79.78±4.04% ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 3

ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย

ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก 0.50 กก.บีโอดี/ม^3/วัน 0.75 กก.บีโอดี/ม^3/วัน และ 1.00 กก.บีโอดี/ม.^{3}/วัน คุณภาพน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ย 8.50±5.41 มก./ล.13.67±5.97 มก./ล.

และ 21.72±7.47 มก./ล.คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย 80.13 ± 8.08%, 67.03 ± 8.74 % และ 46.04 ± 14.85% ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 4

ค่าพีเอชหลังการบำบัด

ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก 0.5 กก.บีโอดี/ม^3/วัน 0.75 กก.บีโอดี/ม^3/วัน และ 1.00 กก.บีโอดี/ม^3/วัน คุณภาพน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าพีเอชเฉลี่ย 7.41±0.15 7.39±0.21 และ 7.46±0.12 ตามลำดับ ดังแสดงในTable 5 จากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชของน้ำทิ้งภายหลังการบำบัดทุกชุดการทดลอง มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อันเป็นผลมาจากเปลือกหอยนางรมมีส่วนประกอบของหินปูน 86.68 % (ศศิพันธุ์ และคณะ, 2541) จึงค่อยๆปลดปล่อยแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) สู่ระบบ (Liu *et al*., 2010) อย่างไรก็ตามค่าพีเอชภายหลังการบำบัดยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ (สมพงษ์, 2552)

ปริมาณฟิล์มจุลินทรีย์ในระบบ

ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณ MLSS จากผิวของตัวกลาง ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก 0.50 กก.บีโอดี/ม^3/วัน 0.75 กก.บีโอดี/ม^3/วัน และ 1.00 กก.บีโอดี/ม^3/วัน มีปริมาณจุลินทรีย์ยึดเกาะที่เกิดบนตัวกลาง 6,260.00 มก./ล. 6,177.78 มก./ล.และ 4,129.03 มก./ล.ตามลำดับ บ่งชี้ว่าระบบมีค่า MLSS ค่อนข้างสูง ทำให้สามารถลดระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสียในถังปฏิกิริยาลงได้ ดังนั้นจึงใช้ขนาดถังที่เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบบำบัดแบบจุลินทรีย์แขวนลอย (Pedro and Dobie, 2006) นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่า ปริมาณ MLSS มีค่าน้อยลงเมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุกเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากขึ้น จุลินทรีย์จะมีการเติบโตได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกลุ่ม heterotrophic bacteria (Tran *et al*., 2007) แต่จากการทดลองกับพบแนวโน้มตรงกันข้าม อธิบายได้ว่าเมื่อมีการป้อนน้ำเสียเข้าระบบด้วยอัตราการไหลที่สูงขึ้น ทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างของเหลวกับฟิล์มจุลินทรีย์ ส่งผลให้จุลินทรีย์หลุดลอกออกมา จึงเกิดฟิล์มจุลินทรีย์ยึดเกาะบนตัวกลางลดลง สำหรับปริมาณตะกอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นทุกชุดการทดลองมีปริมาณน้อย และไม่พบปัญหาการอุดตันของระบบ

Table 2 Characteristics of influent wastewater.

Parameter	Average value	Range
p H	7.16 ± 0.10	7.01 - 7.34
BOD (mg/l)	122.99 ±14.23	101.95-144.29
SS (mg/l)	41.00 ± 11.66	23.33-66.67

Table 3 Results of BOD removal.

organic loading rate	Influent BOD (mg/l)	Effluent BOD (mg/l)	% BOD removal
0.50 kg BOD/m^3/d	122.99±14.23	16.27±3.26	86.72 ±2.42
0.75 kg BOD/m^3/d		19.32±3.60	84.15 ±3.06
1.00 kg BOD/m^3/d		24.58±4.28	79.78 ± 4.04

Table 4 Results of SS removal.

organic loading rate	Influent SS (mg/l)	Effluent SS (mg/l)	% SS removal
0.50 kg BOD/m^3/d	41.00±11.66	8.50±5.41	80.13 ± 8.08
0.75 kg BOD/m^3/d		13.67±5.97	67.03 ± 8.74
1.00 kg BOD/m^3/d		21.72±7.47	46.04 ± 14.85

Table 5 Comparison of pH value in the influent and the effluent.

organic loading rate	Influent p H	Effluent p H
0.50 kg BOD/m^3/d	7.16 ± 0.10	7.41±0.15
0.75 kg BOD/m^3/d		7.39±0.21
1.00 kg BOD/m^3/d		7.46±0.12

ผลกระทบของอัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุก

ผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุกเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีและของแข็งแขวนลอยลดลง ดังแสดงใน Figure3 และ Figure 4 เนื่องจากการเพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุกทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบเพิ่มขึ้นซึ่งจุลินทรีย์ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายเพิ่มขึ้น (สันทัด, 2552) แต่การในการทดลองครั้งนี้ เพิ่มอัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุกโดยการป้อนน้ำเสียเข้าระบบด้วยอัตราการไหลที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสียในถังปฏิกิริยาลดต่ำลง จุลินทรีย์มีเวลาย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียน้อยลง และอัตราการไหลที่เร็วขึ้น ทำให้เกิดแรงเฉือน ชะฟิล์มจุลินทรีย์หลุดลอกออกมา ส่งผลต่อคุณภาพน้ำทิ้งและประสิทธิภาพการบำบัด

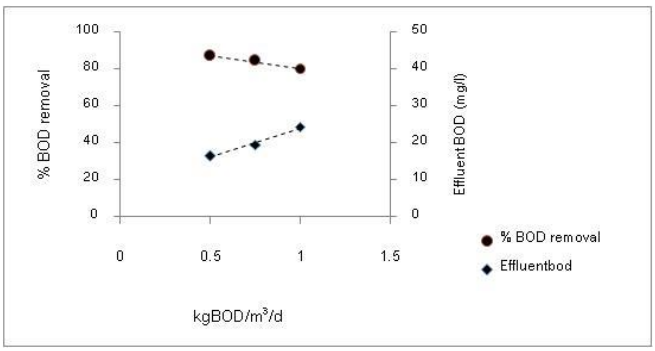


Figure 3 Effect of organic loading rates on BOD removal.

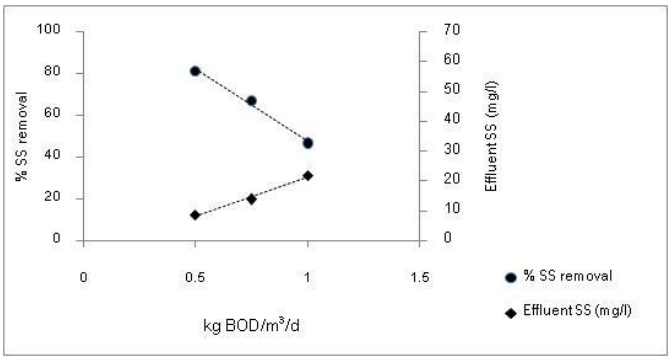


Figure 4 Effect of organic loading rates on SS removal.

สรุป

จากผลการศึกษาพบว่า อัตราภาระสารอินทรีย์บรรทุกที่เหมาะสม คือ 0.5 กก.บีโอดี/ม^3/วัน และ0.75 กก. บีโอดี/ม^3/วัน คุณภาพน้ำทิ้งมีค่าบีโอดี 16.27±3.26 มก./ล.และ 19.32±3.60 มก./ล.คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 86.72±2.42% และ 84.15±3.06 % ตามลำดับ น้ำทิ้งมีค่าของแข็งแขวนลอย 8.50±5.41มก./ล.และ 13.67±5.97 มก./ล.คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 80.13±8.08 % และ 67.03±8.74% ตามลำดับ ค่าพีเอชของน้ำทิ้งภายหลังการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเปลือกหอยนางรมมีส่วนประกอบของหินปูนจึงปลดปล่อยแคลเซียมคาร์บอเนตออกมา เปลือกหอยนางรมมีพื้นผิวขรุขระทำให้มีปริมาณจุลินทรีย์ยึดเกาะบนตัวกลางค่อนข้างมาก อีกทั้งเปลือกหอยนางรมมีรูปร่างไม่แน่นอน เมื่อมาจัดวางลงในระบบจึงเกิดช่องว่าง ทำให้ไม่พบปัญหาการอุดตันในระหว่างการทดลอง เปลือกหอยนางรมสามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบจุลินทรีย์ยึดเกาะได้ดี มีน้ำหนักเบาและคงทน ก่อนนำมาใช้ต้องทำความสะอาดและแช่น้ำให้ความเค็มลดลง น้ำเสียที่ป้อนเข้าระบบควรผ่านตะแกรงเพื่อดักเศษสิ่งสกปรกที่อาจทำให้ระบบอุดตัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีจากภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2547. **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 5**.พิมพ์ครั้งที่1.เอสอาร์พริ้นติ้งแมสโปรดักส์, กรุงเทพฯ.

_____. 2550. **วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม**. พิมพ์ครั้งที่4. สยามสเตชั่นเนอรี่ซัพพลายส์,กรุงเทพฯ.

ศศิพันธุ์ ณ สงขลา,อุษณีย์ สันตติวงศ์ไชย, สุรพงษ์ พิมพ์จันทร์, ชาญชัย อัศววินิจกุลชัย และสมพร จองคำ. 2541. การวิเคราะห์ธาตุในเปลือกหอยโดยวิธีนิวเคลียร์ ,น.581-589 *ใน* **รายงานการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 7** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ. 2552. **กระบวนการบำบัดเสียทางชีวภาพ**.พิมพ์ครั้งที่1.สยามสเตชั่นเนอรี่ซัพพลายส์,กรุงเทพฯ

สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2542. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในระบบเลี้ยงตะกอนเร่งแบบกะ. **วารสารเทคโนโลยีสุรนารี** 6: 11-21.

อรุณวรรณ หวังกอบเกียรติ และ นุกูล อินทระสังขา. 2538. การบำบัดน้ำทิ้งแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้ตัวกลางต่างชนิดกัน ในระบบฟิกส์เบดแอเรชัน,น.538-548 *ใน* **รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 33** (สาขาประมง วิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ อุตสาหกรรมเกษตร ศึกษาศาสตร์ มนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์ การจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

American Public Health Association (APHA). 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st ed., American Public Health Association, Washington DC.

David, H., F. L. and G. L. Bela. 2000. **Wastewater Treatment**. CRC Press LLC., Boca Raton.

Metcalf and Eddy. 1981. **Wastewater Engineering** 3rd ed. McGraw-Hill.Inc., Singapore.

Liu, Y., X. Yang TO, D.X. Yuan and X.Y. Wu. 2010. Study of municipal wastewater treatment with oyster shell as biological aerated filter medium. **Desalination** 254 : 149-153.

Luo H., G. Huang, X.Fu, X. Liu, D. Zheng, J. Peng, K. Zhang, B. Huang, L. Fan, F. Chen and S. Xiubo. 2013. Waste oyster shell as a kind of active filler to treat the combined wastewater at an estuary. **Journal of Environmental Sciences** 25(10) : 2047-2055.

Pedro, P.B. and W.K. Dobie. 2006. A submerged attached growth bioreactor for decentralized wastewater treatment. **WEF TEC** 06 : 4608-4615.

Qiu, L. ,J. Ma and Zhang. 2007. Characteristics and utilization of biologically aerated filter backwashed sludge. **Desalination** 208 : 73-80.

Tran , H.T., D.H. Kim, Y.H. Jia, S.J. Oh and D.H. Ahn. 2007. A study on start up operation of fixed bed biofilm sequencing batch reactor (FbSBR) for piggery wastewater treatment. **J.Ind.Eng.Chem** 13(6) : 985-991.

บทบาทของพื้นที่สีเขียวบริเวณริมถนนกับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก

The Role of Roadside Green Area and Fine Particulate Matter

ศิรภัสร์ โคตรสีวงษ์* สุดารัตน์ ทรัพย์สินชัย ศศิธร แม้นวิลัย รตีวรรณ สุวัฒนมาลา และ เอมอร ประจวบมอญ

Sirapat Khodseewong*, Sudarat Suapsinchai, Sasithon Maenvilai, Ratiwun Suwattanamala and Aimorn Prachuabmorn

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ในพื้นที่สีเขียวบริเวณริมถนน เขตเทศบาลเมืองแสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี พื้นที่การศึกษาได้แก่ บริเวณถนนลงหาดบางแสน และบริเวณถนนสุขุมวิท การเก็บตัวอย่างในแต่ละพื้นที่ แบ่งเป็น 3 พื้นที่ย่อย ได้แก่บริเวณไม่มีต้นไม้เป็นจุดควบคุม บริเวณที่มีพื้นที่สีเขียวประมาณร้อยละ 20 และมากกว่าร้อยละ 30 ของพื้นที่ผิวถนน เก็บตัวอย่างในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2558 ผลการศึกษาพบว่าบริเวณถนนลงหาดบางแสนการจราจรมีจำนวนรถ 2,647 คันต่อ 24 ชม. ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กมีค่า 279 ถึง 847 มคก./ม.^{3} จุดเก็บตัวอย่างบริเวณที่มีพื้นที่สีเขียวร้อยละ 23 และ 34 มีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่าจุดควบคุมร้อยละ 33 และ 67 ตามลำดับ บริเวณถนนสุขุมวิทการจราจร มีจำนวนรถ 3,175 คันต่อ 24 ชม.ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กมีค่า 842.5 ถึง 1,963.5 มคก./ม.^{3} จุดเก็บตัวอย่างบริเวณที่มีพื้นที่สีเขียวร้อยละ 21 และ 32 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่าจุดควบคุมร้อยละ 14 และ 57 ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าพื้นที่สีเขียวช่วยลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กได้โดยเฉพาะเมื่อพื้นที่มากกว่าร้อยละ 30 ของพื้นผิวถนน

ABSTRACT

This study aimed to investigate the $PM_{2.5}$ concentrations in green area at roadside located in Saensuk municipality, Muang district, Chonburi province. Sampling location were set at Longhard Bangsaen road and Sukhumvit road. Each sampling was performed in the same area, where 3 subsamples were taken from area without trees as control, approximately 20% of green area and more than 30 % of green area of road area. Air sampling was conducted in August 2015. The results showed that Longhard Bangsaen road had a traffic load of 2,647 vehicles/24 hours. The $PM_{2.5}$ concentrations ranged from 279 to 847 $\mu g/m^3$. Fine particulates collected from the 23% and the 34% of green area exhibited lower concentration than the control by 33% and 67 % respectively. The traffic density of Sukhumvit road was 3,175 vehicles/24 hours. The $PM_{2.5}$ levels ranged from 842.5 to 1,963.5 $\mu g/m^3$. They were found lower at the 21% and the 32% of green area as compared to control area by 19% and 57 % respectively. Thus, it may be assumed that green area could be efficient for reducing fine particulates in the air, especially where the green area covers more than 30% of roadside area.

Key Words :fine particulate matter, green area, air pollution, tree diversity

* Corresponding author; e-mail address: aimornp@buu.ac.th

ภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131

Department of Environmental Health, Faculty of Public Health,Burapha University, Chonburi 20131

คำนำ

จากสภาวการณ์ที่ภูมิอากาศของโลกเปลี่ยนแปลงก่อให้เกิดผลกระทบมากมายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยมีสาเหตุสำคัญจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก จังหวัดชลบุรีมีการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปัจจุบันปริมาณรถยนต์ที่สัญจรไปมาในจังหวัดชลบุรีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศจากการจราจรตามมา ซึ่งจะปรากฏในรูปก๊าซและฝุ่นละอองขนาดเล็ก ซึ่งผลกระทบทางด้านสุขภาพนั้นพบว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน สามารถผ่านเข้าไปในทางเดินหายใจได้ลึก โดยเฉพาะในกลุ่มเสี่ยงได้แก่ เด็กและคนชรา และคนที่มีโรคของระบบทางเดินหายใจ ทำให้ในปัจจุบันได้มีการรณรงค์ต่างๆ เช่น การเพิ่มพื้นที่สีเขียว เพราะต้นไม้นั้นสามารถดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และยังสามารถดักจับฝุ่นขนาดเล็กได้ดีอีกด้วย

มีการศึกษาถึงหลังคาสีเขียวที่มีการปลูกพืชที่สามารถลดมลพิษทางอากาศ ทั้งลดการปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศ มีการเก็บกักคาร์บอนได้ดีขึ้น มีผลต่อคุณภาพน้ำไหลบ่าหน้าดินจากพายุ ลดมลพิษทางเสียง และส่งผลต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ด้วย (Rowe, 2011; Yang *et al*., 2008; Getter and Rowe, 2008) การศึกษาแบบจำลองการตกสะสมแบบแห้ง แสดงถึงหลังคาสีเขียว สามารถลดมลพิษทางอากาศได้ 1,675 กิโลกรัมต่อ 19.68 เฮกแตร์ ต่อปี ซึ่งสามารถลดก๊าซโอโซนได้ ร้อยละ 52 ลดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 27 ลดฝุ่นขนาดเล็กกว่าขนาด 10 ไมครอน (PM10) ได้ร้อยละ 14 และลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ร้อยละ 7 (Yang *et al*., 2008) จากปัญหามลพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็กส่งผลกระทบอย่างมากต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ ทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับพืชต่อการบำบัดฝุ่นมากขึ้น โดยพืชมีกลไกช่วยลดขนาดปัญหาที่แตกต่างกันทั้งชนิด ลักษณะของใบ และสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ในพื้นที่ เป็นต้น โดยฝุ่นละอองขนาดเล็กจะตกลงบนใบพืช และเกาะติดกับใบไม้ที่มีลักษณะขึ้น หยาบ มีขน หรือผิวที่มีประจุไฟฟ้า (Yang *et al*., 2015) และการคายน้ำของต้นไม้ช่วยเพิ่มความชื้นและทำให้ละอองในอากาศชื้นมีน้ำหนักตกลงสู่พื้นเร็วขึ้น ดังนั้นบริเวณพื้นที่สีเขียวมีความหลากหลายของพืชพรรณพืชพรรณจะทำให้สามารถกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ดี การศึกษาชนิดของพืชบนหลังคาในประเทศอังกฤษต่อการบำบัดฝุ่นขนาดเล็กขนาด 10 ไมครอน (PM10) โดยพืช 4 ชนิดในการลดฝุ่นขนาดเล็กพบว่า *Agrostis stolonifera* และ *Festuca rubra* สามารถการลดฝุ่นขนาดเล็กขนาด 10 ไมครอนได้ดีกว่า *Plantago lanceolata* และ *Sedum album* ในพื้นที่หลังคาสีเขียวขนาด 325 เฮกแตร์ ปริมาณฝุ่นลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 2.3 ของปริมาณฝุ่นขนาด 9.18 ตัน (Speak *et al*., 2012)

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดและความหลากหลายของพืชพรรณต่อปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ในพื้นที่สีเขียวบริเวณริมถนน เขตเทศบาลเมืองแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี พื้นที่การศึกษาได้แก่บริเวณถนนลงหาดบางแสน หน้ามหาวิทยาลัยบูรพา และบริเวณถนนสุขุมวิทหน้าตลาดหนองมนที่มีการจราจรค่อนข้างสูง และมีกิจกรรมริมถนนทั้งการค้าขาย และนักท่องเที่ยวจำนวนมาก ซึ่งจะได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองขนาดเล็กจนมีผลต่อสุขภาพ การศึกษาขนาดและชนิดของพืชพรรณพื้นที่สีเขียวบริเวณริมถนนต่อการลดลงของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก อาจใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาในการเพิ่มพื้นที่สีเขียวในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือในการเก็บตัวอย่าง

เครื่องเก็บตัวอย่าง PQ200 Ambient Air Particulate Sampler (BGI Company, USA)

ชุดปรับเทียบความถูกต้อง Bios Defender 530 (Brandt Instruments Company, USA)

วิธีการศึกษาปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า ไมครอน 2.5

วิธีการตรวจวัดด้วยวิธีกราวิเมตริก (Gravimetric method) เป็นวิธีการมาตรฐานของ US.EPA.

ความสูงของการติดตั้งเครื่องมือประมาณ 1.5 เมตร

การคัดเลือกพื้นที่

สำรวจพื้นที่ผิวจราจรที่มีขนาดพื้นที่มีขนาดใกล้เคียงกัน 3 พื้นที่ ที่มีลักษณะแตกต่างกันคือ พื้นที่ที่ไม่มีต้นไม้ พื้นที่ที่มีต้นไม้ ร้อยละ 20 และพื้นที่ที่มีต้นไม้มากกว่าร้อยละ 30

จุดเก็บตัวอย่าง

จุดเก็บตัว ถนนลงหาดบางแสนอย่างริมถนน ฝั่งมหาวิทยาลัยบูรพา หันเครื่องมือไปทิศเหนือ ส่วนถนนสุขุมวิทเก็บตัวอย่างริมถนนฝั่งตลาดหนองมนหันเครื่องมือไปทิศตะวันออก โดยถ้าต้องการวัดฝุ่นละอองจากยานพาหนะ ให้ติดตั้งเครื่องเก็บตัวอย่าง ใกล้ถนนที่มีรถติดมากที่สุด ไม่มีสิ่งกีดขวาง และในถนนที่คาดว่าจะมีความเข้มข้นของฝุ่นสูง วันที่เก็บตัวอย่างเลือกวันที่แดดจ้า ไม่มีฝนตก ความเร็วลมและทิศทางลมทั้งสามจุดในทิศเดียวกัน

วิธีการดำเนินงาน

1. การศึกษาขนาดพื้นที่สีเขียว โดยแบ่งเป็น 2 ชุด คือ

ชุดที่ 1 บริเวณที่ศึกษาถนนลงหาดบางแสน (หน้ามหาวิทยาลัยบูรพา) ตรวจวัดพื้นที่ที่ไม่มีพื้นที่สีเขียวเป็นจุดควบคุม เปรียบเทียบกับ พื้นที่ขนาดของพื้นที่สีเขียวประมาณ ร้อยละ 20 และ พื้นที่มีขนาดของพื้นที่สีเขียวมาก คือมากกว่าร้อยละ 30 ตามเกณฑ์มาตรฐานพื้นที่สีเขียวที่กำหนดให้ชุมชนขนาดใหญ่ กลาง เล็ก ควรมีพื้นที่สีเขียวมากกว่าร้อยละ 30 ของพื้นผิวจราจร (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2550) ทำการวัดขนาดของพื้นที่สีเขียว คำนวณเป็นร้อยละโดยเทียบกับขนาดพื้นที่ทั้งหมด ชุดที่ 2 ถนนสุขุมวิท (บริเวณสี่แยกบริเวณทางไปตลาดหนองมน) ทำการ ตรวจวัดพื้นที่ที่ไม่มีพื้นที่สีเขียว พื้นที่ขนาดของพื้นที่สีเขียว ขนาดของพื้นที่สีเขียว ร้อยละ 20 และ พื้นที่ขนาดของพื้นที่สีเขียวมากกว่าร้อยละ 30 ทำการวัดขนาดของพื้นที่สีเขียว คำนวณเป็นร้อยละโดยเทียบกับขนาดพื้นที่ทั้งหมด โดยใช้ตลับเมตร

2. การศึกษาความหลากหลายของพืชพรรณภายในพื้นที่สีเขียว ตรวจนับชนิดของพืชพรรณ และลักษณะทางกายภาพอื่นๆ เช่น ขนาดของต้นไม้ และ ใบ ภายในบริเวณพื้นที่สีเขียว

3. การศึกษาปริมาณฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5) โดยติดตั้งเครื่องมือเก็บตัวอย่างในพื้นที่ที่ศึกษา ทำการเก็บตัวอย่าง บันทึกจำนวนรถแต่ละชนิด บันทึกอุณหภูมิ อัตราการไหล และความดัน ก่อนและหลังเก็บตัวอย่าง บันทึกทิศทางลมและกิจกรรมอื่นๆ ที่อาจส่งผลต่อการเก็บตัวอย่าง

การศึกษาความหลากหลายของพืชพรรณภายในพื้นที่สีเขียว

สำรวจและนับชนิดของต้นไม้หรือลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ เช่น ขนาดของต้นไม้ และ ใบที่แตกต่างกันภายในบริเวณ พื้นที่สีเขียวที่กำหนด

การคำนวณหาอัตราการดูดอากาศที่สภาวะมาตรฐาน

$$Q_{std}=Q_a \frac{P_a}{P_{std}} \frac{T_{std}}{T_a}$$

Q_a= อัตราการดูดของอากาศขณะเก็บตัวอย่าง, ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

T_a= อุณหภูมิขณะเก็บตัวอย่าง, องศาเคลวิน

P_a= ความดันบรรยากาศขณะเก็บตัวอย่าง, มิลลิเมตรปรอท

T_{std} = อุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน, 298 เคลวิน

P_{std} = ความดันบรรยากาศที่สภาวะมาตรฐาน, 760 มิลลิเมตรปรอท

คำนวณหาปริมาตรอากาศทั้งหมดที่ใช้เก็บตัวอย่าง

$$V_{std} = Q_{std} \times t$$

V_{std} = ปริมาตรอากาศมาตรฐาน, ลูกบาศก์เมตร

Q_{std}=อัตราการไหลของอากาศมาตรฐาน, ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

t = เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล, ชั่วโมง

คำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน

$$PM_{2.5}\left(\frac{\mu g}{m^3}\right) = \frac{(W_i - W_f)}{V_{std}} \times 10^6$$

$PM_{2.5}(\mu g/m^3)$ = ปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ, ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

W_i = น้ำหนักกระดาษกรองก่อนเก็บตัวอย่าง, กรัม

W_f= น้ำหนักกระดาษกรองหลังเก็บตัวอย่าง, กรัม

ผลและวิจารณ์

ความสัมพันธ์ของขนาดพื้นที่สีเขียวกับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน

การศึกษาความสัมพันธ์ของพื้นที่สีเขียวบริเวณริมถนนกับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน เพื่อศึกษาขนาดและความหลากหลายของพืชพรรณในพื้นที่สีเขียว ในการบำบัดมลพิษทางอากาศ บริเวณริมถนนลงหาดบางแสน และบริเวณริมถนนสุขุมวิท พบว่าบริเวณถนนลงหาดบางแสน มีจำนวนรถ 2,647 คันต่อ 24 ชั่วโมง แบ่งเป็นรถจักรยานยนต์ 1,129 คัน รถเก๋ง 839 คัน รถกระบะ 586 คัน รถตู้ 67 คัน และรถบรรทุก 26 คัน และถนนสุขุมวิท มีจำนวนรถ 3,175 คันต่อ 24 ชั่วโมง รถจักรยานยนต์ 1,120 คัน รถเก๋ง 980คัน รถกระบะ 905 คัน รถตู้ 125 คัน และรถบรรทุก 45 คัน จากจำนวนรถโดยเฉลี่ยพบว่าถนนสุขุมวิทมีจำนวนรถขนาดใหญ่มากกว่าทุกประเภท ยกเว้นรถจักรยานยนต์ที่น้อยกว่าถนนลงหาดบางแสนเล็กน้อย เชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งดีเซล และเบนซินเป็น แหล่งของฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ชนิดของรถ ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Type of vehicle.

Vehicle Types	Longhard Bangsaen Road	Sukumvit Road
Motorcycle	1,129	1,120
Car	839	980
Pickup truck	586	905
Van	67	125
Truck	26	45
Total	2,647	3,175

ผลการศึกษาบริเวณถนนลงหาดบางแสน ขนาดพื้นที่ที่สำรวจ 3 จุดที่มีลักษณะตามข้อกำหนดเบื้องต้น มีขนาด 354.2 ตารางเมตร (กว้าง 15.4 เมตร ยาว 23 เมตร) ในพื้นที่ไม่มีต้นไม้ (จุดควบคุม) มีปริมาณฝุ่นละออง

ขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน มากที่สุดที่ 847 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนบริเวณที่มี พื้นสีเขียว ร้อยละ 23.2 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนลดลงร้อยละ 33 เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ไม่มีต้นไม้ เหลือ 564 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อ 24 ชั่วโมง และเมื่อพื้นที่สีเขียวเพิ่มขึ้น คือ ร้อยละ 34 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ลดลงร้อยละ 67 เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ไม่มีต้นไม้เลย ปริมาณ 278.9 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

บริเวณถนนสุขุมวิท ขนาดพื้นที่ 518 ตารางเมตร (กว้าง 18.5 เมตร ยาว 28 เมตร) ในพื้นที่ไม่มีต้นไม้ (จุดควบคุม) มีปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน มากที่สุดที่1,963.5ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนบริเวณที่มีพื้นที่สีเขียว ร้อยละ 21 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนลดลงร้อยละ14 เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ไม่มีต้นไม้ มีปริมาณ 1,681 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อ 24 ชั่วโมงและเมื่อพื้นที่สีเขียวเพิ่มขึ้น คือ ร้อยละ 32 ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ลดลงร้อยละ 57 เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ไม่มีต้นไม้เลย ปริมาณ 842.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พื้นที่การเก็บตัวอย่างฝุ่นขนาดเล็กแสดงใน Figure 1 และปริมาณฝุ่นขนาดเล็กจากถนนลงหาดบางแสนและถนนสุขุมวิทที่ตรวจวัดได้ แสดงใน Table 2



a b

Figure 1 Sampling site at a: Longhard Bangsaen Road and b: Sukumvit Road

Table 2 Amount of particulate matter (PM 2.5) per 24 hrs. and green area.

% of Green area	PM2.5 Conc.($\mu g/m^3$)	% PM2.5 Removal Efficiency
Longhard Bangsaen Road		
0	847	-
23.2	564	33
34	279	67
Sukhumvit Road		
0	1,963.5	-
21	1,681	14
32	842.5	57

ผลการศึกษาแสดงให้ถึงความสามารถของพื้นที่สีเขียวในการกรองฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะเมื่อมีขนาดพื้นที่สีเขียวมากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งมีขนาดเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานพื้นที่สีเขียวบริเวณเส้นทางสัญจร (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2550) สามารถลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กได้มาก พืชพรรณในพื้นที่สีเขียวมีบทบาทสำคัญต่อการลดลงของฝุ่นละอองขนาดเล็กและสารมลพิษทางอากาศ (Dadvand *et al*., 2015; Nguyen *et al*., 2015; Chen *et al*., 2016; Kocic *et al*., 2014) ต้นไม้ทำหน้าที่กรองอากาศ (Chen *et al*., 2016) ใบพืชช่วยดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก ลักษณะของใบ ขนาดและรูปทรงของใบ ชนิดของพืช ล้วนมีผลต่อการตกสะสมของฝุ่นละอองขนาดเล็กบนใบไม้ (Yang *et al*., 2015; Nguyen *et al*., 2015; Kocic *et al*., 2014) การคายน้ำของพืชจะทำให้ฝุ่นละอองในอากาศชื้นและมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น จึงตกลงสู่พื้นได้เร็วขึ้น (Speak *et al*., 2012) นอกจากนี้รูปทรงของต้นไม้ ความหนาแน่นการปกคลุมเรือนยอดไม้ (canopy density) ความสูงและความหนาแน่นของต้นไม้ ยังมีผลต่อการไหลเวียนของอากาศ และการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมอันเป็นปัจจัยทางอ้อมที่มีผลต่อการแพร่กระจายและการตกลงสู่พื้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Dadvand *et al*., 2015; Chen *et al*., 2016) ดังนั้นต้นไม้ที่ปลูกในพื้นที่สีเขียวไม่ควรแน่นทึบ และไม่ควรมีรูปทรงสลับซับซ้อนจนเกินไป เนื่องจากจะไปกีดขวางหรือ ชะลอความเร็วของกระแสลม ทำให้ความปั่นป่วนของอากาศค่อนข้างน้อย ฝุ่นละอองขนาดเล็กจะฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศและตกลงสู่พื้น (Chen *et al*., 2016) ต้นไม้ประเภทไม้พุ่มให้ประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ดีเพราะมีพื้นที่ของใบมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนพื้นที่ (Chen *et al*., 2016) จึงเหมาะสมที่จะนำมาปลูกในพื้นที่สีเขียว การเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้มีขนาดมากกว่าร้อยละ 30 ของพื้นผิวถนนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มาจากการจราจร

ความสัมพันธ์ของความหลากหลายของพืชพรรณกับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน

ความหลากหลายของพืชพรรณในพื้นที่สีเขียวมีความสัมพันธ์กับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน หมายความว่า พื้นที่สีเขียวมีต้นไม้ 8 และ 9 ชนิด จะลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนได้ประมาณ ร้อยละ 57 และ 67 ของปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก บริเวณถนนลงหาดบางแสนและถนนสุขุมวิท

ชนิดของพืชที่พบบริเวณถนนลงหาดบางแสนที่มีขนาดพื้นที่สีเขียวร้อยละ 23 ได้แก่ ต้นชาฮกเกี้ยน (*Carmona retusa* (Vahl) Masam.) ต้นโกสน (*Codiaeum variegatium* (L.) Blume) ต้นแพงพวยฝรั่ง *(Catharanthus roseus* G. Don.*)* ต้นไทรยอดทอง (*Ficus microcarpa L.f. cv. Golden Leaves*) ต้นหมากนวล (Veitchia merrillii H.E. Moore) ต้นกันเกรา *(Fagraea fragrans* Roxb.) และ ต้นราชพฤกษ์(*Cassia fistula* L.)

ส่วนบริเวณถนนลงหาดบางแสนที่มีขนาดพื้นที่สีเขียวร้อยละ 34 มีพืช 9 ชนิด ได้แก่ ได้แก่ ต้นชาฮกเกี้ยน (*Carmona retusa* (Vahl) Masam.) ต้นโกสน (*Codiaeumbariegatum L.)Bl.)(* ต้นแพงพวยฝรั่ง *(Catharanthus roseus* G. Don.*)* ต้นไทรยอดทอง (*Ficus microcarpa L.f. cv. Golden Leaves*) ต้นหมากนวล (Veitchia merrillii H.E. Moore) ต้นหางนกยูง *(Caesalpinia pulcherrima* (L(. Sw.) ต้นสะเดา(*Azadirachta indica*) ต้นกันเกรา *(Fagraea fragrans* Roxb.) และ ต้นตะแบก *(Lagerstroemia floribunda Jack*)

สำหรับถนนสุขุมวิทพื้นที่ที่มีต้นไม้น้อยมี พื้นที่สีเขียวร้อยละ 21 จำนวนพืช 5 ชนิด ได้แก่ ต้นชาฮกเกี้ยน (*Carmona retusa* (Vahl) Masam.) ต้นไทรยอดทอง *(Ficus microcarpa L.f. cv. Golden Leaves*) ต้นวาสนา *(Dracaena fragrans*) ต้นมะม่วง *(Manaifera indica* Linn.) ต้นโมก(*Wrightia religiosa* Benth.) *พบปริมาณฝุ่นลดลงร้อยละ14*

ต้นไม้บริเวณถนนสุขุมวิทที่มีพื้นที่สีเขียวร้อยละ 32 มี 8 ชนิด ได้แก่ต้นชาฮกเกี้ยน ต้นไทรยอดทอง *(Ficus microcarpa L.f. cv. Golden Leaves*) ต้นหมากนวล (Veitchia merrillii H.E. Moore) ต้นหูกวาง (*Terminalia catappa*) ต้นมะละกอ(*Carica papaya* L.) ต้นรัก(*Calotropis gigantea* (Linn.) R.Br.ex Ait.) ต้นโมก(*Wrightia religiosa* Benth.) และต้นมะม่วง *(Manaifera indica* Linn.) พบปริมาณฝุ่นลดลงร้อยละ 14 ถึง 57

ความหลากหลายของพืชสามารถบำบัดฝุ่นได้ดีกว่าบริเวณที่มีชนิดของพืชน้อยกว่า ต้นไม้ที่มีใบขนาดเล็ก เช่นต้นชาฮกเกี้ยน (*Carmona retusa* (Vahl) Masam.) สามารถ ลดปริมาณฝุ่นในอากาศได้ดีกว่าพวกใบใหญ่ (David *et al*., 2010; Freer-Smith *et al*., 2005) จากผลการทดลองแสดงถึงความหลากหลายของพืชที่มากขึ้น สามารถลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศได้ในปริมาณมากขึ้นเช่นกัน ผลการศึกษาแสดงใน Table 3

Table 3 Amount of Particulate matter (PM 2.5) and number of tree species.

No.of Species	Particulate matter ($\mu g/m^3$)	% PM2.5 Removal Efficiency
Longhard Bangsaen Road		
0	847	-
7	564	33
9	279	67
Sukhumvit Road		
0	1,963.5	-
5	1,681	14
8	842.5	57

สรุป

การศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดและความหลากหลายของพืชพรรณพื้นที่สีเขียวกับปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอนพบว่าถนนถนนลงหาดบางแสนที่มีขนาดพื้นที่สีเขียวร้อยละ 34 พบปริมาณฝุ่นลดลงร้อยละ 67 และถนนถนนสุขุมวิทที่มีพื้นที่สีเขียวร้อยละ 32 พบปริมาณฝุ่นลดลงร้อยละ 57 และ พบว่าบริเวณที่มีความหลากหลายของพืชพรรณมากมีประสิทธิภาพในการลดฝุ่นได้ดีกว่าพื้นที่ที่มีจำนวนชนิดของพืชพรรณน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขนาดพื้นที่สีเขียวและความหลากหลายของพืชพรรณที่เพิ่มขึ้น สามารถลดปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ปริมาณมาก ทำให้คุณภาพอากาศในภาพรวมดีขึ้น แต่ผลการสำรวจในพื้นที่สีเขียวของเส้นทางจราจรทั้งสองเส้นยังมีพื้นที่สีเขียวไม่ถึงร้อยละ 30 ตลอดทั้งเส้นทาง จึงควรมีการปลูกพืชเพื่อเพิ่มพื้นที่สีเขียวและเลือกชนิดของพืชให้มีความหลากหลายมากขึ้นจะส่งผลถึงการบำบัดฝุ่นขนาดเล็กได้ดีขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [สผ.ทส.]. 2550. **แผนปฏิบัติการเชิงนโยบายด้านการจัดการพื้นที่สีเขียวชุมชนเมืองอย่างยั่งยืน**.

Chen, L., C. Liu, R. Zou, M. Yang and Z. Zhang. 2016. Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. **Environmental Pollution** 208(2016): 198-208.

Dadvand, P., I. Rivas, X. Basagaña, M. Alvarez-Pedrerol, J. Su, M.D.C. Pascual, F. Amato, M. Jerret , X. Querol, J. Sunyer, M.J. Nieuwenhuijsen. 2015. The association between greenness and traffic-related air pollution at schools. **Science of theTotal Environment** 523 (2015): 59–63.

David, R., F. Lens. E. Smets and S. Jansen. 2010. The phylogenetic significance of vestured pits in Boraginaceae. **TAXON** 59 (2): 510–516.

Freer-Smith, P.H., K.P. Beckett and G. Taylor. 2005. Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, Populus deltoides X trichocarpa 'Beaupré', Pinus nigra and X Cupressocyparis leylandii for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment **Environmental Pollution** 133(1):157-167.

Getter, K. L. and D.B. Rowe. 2008. The Role of Extensive green roofs in sustainable development. **Atmospheric Environment** 42 (2008): 7266–7273.

Kocic , K., T.Spasic, M. A.Uroševic , M.Tomaševic. 2014. Trees as natural barriers against heavy metal pollution and their role in the protection of cultural heritage. **Journal of Cultural Heritage** 15(3): 227–233.

Nguyen, T., X.Yu, Z. Zhang, M. Liu and X. Liu. 2015. Relationship between types of urban forest and $PM_{2.5}$ capture at three growth stages of leaves. **Journal of Environmental Sciences** 271: 33–41.

Rowe, D.B. 2011. Green roofs as a means of pollution abatement. **Environmental Pollution** 159 (8-9): 2100-2110.

Speak, F., J.J. Rothwell and S.J. Lindley. 2012. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. **Atmospheric Environment** 61: 283–293

Yang, J., Q. Yu and P. Gong. 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago **Atmospheric Environment** 42 (2008): 7266–7273.

Yang, J., Y. Chang and P. Yan. 2015. Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution. **Atmosphereic Pollution Research** 6(2015): 267-277.

การบำบัดไอระเหยจากน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยตัวกรองชีวภาพจากเปลือกถั่วลิสง

Fuel Vapors Removal Efficiency by Peanut Shell Biofilter

จุฑามาศ ไขรัศมี* พนม พรหมโสภา สราลีวัลย์ ฤๅชา รตีวรรณ สุวัฒนมาลา และเอมอร ประจวบมอญ

Juthamas Khairassamee*, Pranom Promsopa, Saraleewan Ruecha, Ratiwun Suwattanamala, and Aimorn Prachuabmorn

บทคัดย่อ

การศึกษาการบำบัดไอระเหยจากน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยตัวกรองชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ แบ่งเป็น 2 ตอน โดยตอนที่ 1 ทดสอบสภาวะของตัวกรองชีวภาพ และทดสอบความชื้นในระบบ เพื่อเลือกสภาวะสำหรับการทดสอบการบำบัดไอระเหยน้ำมันเชื้อเพลิงในตอนที่ 2 ผลการทดสอบพบว่าตัวกรองจากเปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าตัวกรองที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ และสัดส่วนของตัวกรอง ต่อตะกอนน้ำเสียที่สัดส่วน 50 ต่อ 50 มีความชื้นร้อยละ 43.5 ซึ่งอยู่ในช่วงที่กำหนดระหว่างร้อยละ 40 - 80 ตอนที่ 2 ทดสอบการบำบัดไอระเหยจากน้ำมันเชื้อเพลิง 7 วัน ในกล่องทดสอบระบบปิด (ขนาด 10x10x20 เซนติเมตร) ผลการศึกษา ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.8 – 7 ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 43.5 พบว่าไอระเหยของน้ำมันดีเซลลดลงจาก 156.7 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 140.2 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไอระเหยของน้ำมันเบนซินลดลง จาก 3,786 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเป็น 1,120 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และไอระเหยของ ก๊าซโซฮอล์ลดลงจาก 2,944 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเป็น 948 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดไอระเหยของน้ำมันเบนซิน ก๊าซโซฮอล์ และ น้ำมันดีเซล คิดเป็น ร้อยละ 70.4. 67.8 และ 10.5 ตามลำดับ

ABSTRACT

A study on fuel vapors biofiltration in laboratory scale was investigated. The experimental study consisted of two parts. In the first part, biofilter media condition and moisture content were studied and performance study of fuel vapor was completed in the second part. The result showed that sterilized peanut shell biofilter was better performance than non- sterilized biofilter. The ratios of sterilized peanut shell and waste water sludge at 50 : 50 with 43.5% moisture contents that in suitable range 40-80% has been selected. In the second part, biofiltration of fuel vapor was carried out for 7 days with 43.5 % initial moisture content, temperature of 29.5 ºC, pH of 6.8-7 in the closed system chamber (size 10x10x20 cm). The results revealed that diesel, gasoline and gasohol vapors were reduced from 156.7 mg/ m^3 to 140.2 mg/ m^3, 3,786 mg/ m^3 to 1,120 mg/ m^3 and 2,944 mg/ m^3 to 948 mg/ m^3, respectively. In conclusion removal efficiency of gasoline, gasohol and diesel vapors were 70.4%, 67.8% and 10.5 %, respectively.

Key Words: biofiltration, biofilter, VOCs, fuel vapor, peanut shell

* Corresponding author; e-mail address: aimornp@buu.ac.th

ภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131

Department of Environmental Health, Faculty of Public Health,Burapha University, Chonburi 20131

คำนำ

แนวโน้มความต้องการใช้น้ำมันสำเร็จรูปของประเทศไทยมีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากหลายปีที่ผ่านมานี้การพัฒนาแหล่งอุตสาหกรรมต่าง ๆ ภายในประเทศไทยเกิดเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก น้ำมันเชื้อเพลิงมีสารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นองค์ประกอบ เป็นสารมลพิษที่สำคัญอีกประเภทหนึ่งที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นมีส่วนประกอบหลักสำคัญคือ ไฮโดรคาร์บอน โดยทาง United Stage Environmental Protection Agency (USEPA) ได้มีการจัดเรียงลำดับให้ความสำคัญต่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายประมาณ 114 ชนิด ให้เป็นสารอินทรีย์ระเหยที่มีอันตราย เช่น เบนซิน, Toluene และ Dichloromethane เป็นต้น มลพิษเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ (เกริก, 2549; Roger *et al*., 2013)

ปัจจุบันมีเทคนิคต่างๆ ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนในอากาศนั้น ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) การดูดซึม (Absorption) การควบแน่น (Condensation) การสันดาป (Combustion) ระบบเมมเบรน (Membrane System) และวิธีการกรองชีวภาพ (Biofiltration) เป็นต้น ในปัจจุบันเทคนิคการบำบัดมลพิษทางอากาศด้วยวิธีการกรองชีวภาพ เป็นทางเลือกที่มีความสำคัญในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนในอากาศ เนื่องจากเป็นการบำบัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่ค่อนข้างต่ำ การบำบัดด้วยตัวกรองชีวภาพหากมีสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดไอระเหยจากน้ำมันเชื้อเพลิงได้ทำให้คุณภาพอากาศดีขึ้น โดยตัวกรองชีวภาพที่นำมาใช้ในการบำบัด ได้แก่ เปลือกถั่วลิสง กาบมะพร้าว ปุ๋ยหมัก กาบมะพร้าว ชานอ้อย เปลือกไม้ ปุ๋ยคอก ถ่านไม้ โพลียูรีเทนโฟม หินเพอไรต์ ไม้ และ ถ่านกัมมันต์ GAC (Granular Activated Carbon) เป็นต้น (Sene *et al*., 2002; Ramirez–Lopez *et al*.,2003; Lebrero *et al*., 2014; Prachuabmorn and Panich, 2010; Sang-Hun *et al*., 2012)

การศึกษาครั้งนี้ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดอากาศที่ปนเปื้อนไอระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยการกรองชีวภาพด้วยเปลือกถั่วลิสงระหว่างน้ำมัน 3 ชนิดคือ ดีเซล เบนซิน และก๊าซโซฮอล์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์และสารเคมี

เครื่องตรวจวัดสารอินทร์ระเหยง่าย ppb RAE 3000 (Honeywell Company, USA)
ตะกอนน้ำเสีย จากโรงกรองน้ำท่าพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี
เปลือกถั่วจากตลาดหนองมน อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี
น้ำมันเชื้อเพลิงจากสถานีน้ำมัน ปตท, สาขาหนองมน จังหวัดชลบุรี
กล่องแก้วสำหรับทดสอบ (ขนาด 10x10x20 เซนติเมตร)

การทดสอบการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง

นำน้ำมันเชื้อเพลิงที่บรรจุอยู่ในภาชนะปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาทดสอบไอระเหย ภายในกล่องทดสอบระบบปิด (ขนาด 10x10x20 เซนติเมตร) ดูการระเหยเป็นไอ จะระเหยจนหมดพร้อมทั้งบันทึกผลระยะเวลาทดสอบการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงและสังเกตผล 7 วัน เพื่อนำข้อมูลไปประกอบการทดลองในขั้นต่อไป

การทดสอบชนิดของตัวกรองที่ผ่านการฆ่าเชื้อและไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ

1. นำตัวกรองชีวภาพบรรจุลงบนตะแกรงที่อยู่ในกล่องแก้วแบบระบบปิด ใช้เปลือกถั่วลิสงที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ และเปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการฆ่าเชื้อ: กากตะกอนน้ำเสีย อัตราส่วน 75 : 25 และ 70 : 30 ตามสัดส่วนการกรองชีวภาพที่ได้ประสิทธิภาพสูงในการบำบัดไอระเหยไซลีน (Prachuabmorn and Panich, 2010)

2. ทำการกระตุ้นจุลินทรีย์ให้เติบโต โดยการผ่านไอระเหยของก๊าซโซฮอล์เข้าสู่ระบบ เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

3. ทำการเดินระบบการกรองชีวภาพ ต่ออีกเป็นเวลา 5 วัน ตรวจวัดและบันทึกผล

4. คำนวณหาประสิทธิภาพของระบบกรองชีวภาพในการบำบัดก๊าซโซฮอล์

การทดสอบหาความชื้นจากสัดส่วนของตัวกรองชีวภาพ

1. เตรียมส่วนผสมตัวกรองชีวภาพ เปลือกถั่วลิสง : กากตะกอนน้ำเสีย ในอัตราส่วน 75 :25, 70 : 30 , 60 : 40 และ 50 : 50

2. ชั่งน้ำหนักภาชนะหลังจากอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง และบันทึกผล

3. ผสมเปลือกถั่วลิสงและกากตะกอนน้ำเสียให้เข้ากัน บรรจุในภาชนะที่อบแห้งแล้ว

4. นำตัวกรองชีวภาพที่บรรจุในภาชนะชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล

5. นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง (ASTM D 2216,1998)

6. นำภาชนะที่บรรจุตัวกรองชีวภาพเข้าตู้อบความชื้น และนำมาชั่งน้ำหนัก พร้อมบันทึกผล

7. คำนวณหาปริมาณความชื้น

การทดสอบการบำบัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายของน้ำมันเชื้อเพลิง

1. เตรียมตัวกรองชีวภาพจากเปลือกถั่วลิสงที่ทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้น นำไปผสมกับกากตะกอนตามสัดส่วนโดยปริมาตร ที่เลือกจากการทดลองขั้นต้น

2. บรรจุตัวกลางกรองชีวภาพที่ผสมแล้วลงในตะแกรง ซึ่งอยู่ภายในกล่องทดสอบ ขนาด10x10x20 ซม.

3. ระหว่างการทดสอบการบำบัดไอระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง มีการควบคุมความชื้นให้แก่ตัวกรองชีวภาพโดยใช้น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่บรรจุในภาชนะนำมาตั้งไว้กับชุดการทดสอบภายในกล่องทดสอบ ที่เป็นระบบปิด

4. เดินระบบการกระตุ้นจุลินทรีย์โดยผ่านไอระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง 48 ชั่วโมง

5. หลังจากกระตุ้นจุลินทรีย์ให้เติบโตแล้ว 48 ชั่วโมง ทำการเดินระบบการกรองชีวภาพ เป็นเวลา 5 วัน ตรวจวัดและบันทึกผล

6. โดยมีกล่องควบคุม 3 กล่อง ภายในบรรจุบีกเกอร์ที่มีน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดปริมาตร 1 มิลลิลิตร และใช้น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อตั้งไว้ในชุดทดสอบปริมาณ 5 มิลลิลิตร เพื่อให้ระบบมีความชื้นใกล้เคียงกับความชื้นเริ่มต้น (ความชื้นเริ่มต้นที่ร้อยละ 40-80)

7. คำนวณหาประสิทธิภาพของระบบกรองชีวภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการบำบัดโดยการกรองชีวภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

ผลและวิจารณ์

ผลการทดสอบการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง

จากการการทดสอบการระเหยของน้ำมันเพลิง 3 ชนิด ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ในชุดการทดสอบแก้วระบบปิด ขนาด 10x10x20 เซนติเมตร ภายในระยะเวลา 7 วัน ณ อุณหภูมิห้อง 29 องศาเซลเซียส พบว่า น้ำมันดีเซลระเหยได้น้อยมากใช้เวลาการระเหย มากกว่า 7 วัน น้ำมันเบนซิน และ ก๊าซโซฮอล์ ระเหยหมดภายใน 2 วัน เนื่องจากน้ำมันดีเซลมีสถานะเป็นของเหลวสภาพหนืด การระเหยการกลายเป็นไอต่ำ ส่วนน้ำมันเบนซิน และ ก๊าซโซฮอล์ มีการระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายในภาวะอุณหภูมิปกติ ดังแสดงใน Table1

Table 1 Evaporation time for diesel, gasoline and gasohol vapors.

Fuel Types	Evaporation time (Days)
Diesel	> 7
Gasoline	2
Gasohol	2

ผลการทดสอบชนิดของตัวกรองที่ผ่านการฆ่าเชื้อและไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ

จากการทดสอบการบำบัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายของก๊าซโซฮอล์เป็นตัวอย่างในการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 28.5 องศาเซลเซียส สัดส่วนตัวกรอง: กากตะกอนน้ำเสีย อัตราส่วน 75 : 25 และ 70 : 30 ตามสัดส่วนการกรองชีวภาพการบำบัดไอระเหยไซลีน (Prachuabmorn and Panich, 2010) แบ่งเป็น 2 ชุด การทดสอบ พบว่าชุดที่ 1 (สัดส่วนตัวกรอง: กากตะกอนน้ำเสีย อัตราส่วน 75 : 25) กล่องควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ มีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 2,832 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ชุดการทดลองที่ มีเปลือกถั่วลิสงที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อเป็นตัวกลางกรองมีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 2,605 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและชุดการทดลองซึ่งมีเปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการฆ่าเชื้อเป็นตัวกลางกรอง มีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 2, 362 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงว่าตัวกรองที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพการบำบัดไอระเหย ร้อยละ 8 และตัวกรองที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 16.6 ชุดที่ 2 (สัดส่วนตัวกรอง: กากตะกอนน้ำเสีย อัตราส่วน 75 : 25) กล่องควบคุมที่ไม่มีตัวกรอง มีไอระเหย 2,861 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และชุดการทดลองซึ่งมีตัวกรองชีวภาพที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อมีไอระเหย 2,220 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนชุดการทดลองซึ่งมีตัวกรองผ่านการฆ่าเชื้อมีไอระเหย 1, 864 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะเห็นได้ว่าชุดตัวกรองชีวภาพที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพการบำบัดไอระเหย ร้อยละ 22.4 ชุดตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพการบำบัดไอระเหย ร้อยละ 34.9 แสดงว่าความร้อนจากกระบวนการการอบฆ่าเชื้อ (Autoclave) ทำให้ตัวกรองมีสภาพเปลี่ยนไป อาจจะเพิ่มรูพรุนในตัวกลางมากขึ้นเป็นผลการส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับภายในทำให้การบำบัดไอระเหยในภาพรวมสูงขึ้น จากผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดยังอยู่ในระดับต่ำกว่าร้อยละ 50 แต่มีแนวโน้มการบำบัดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มกากตะกอนน้ำเสียจากร้อยละ 25 เป็น 30 ดังนั้นในสภาวะการทดสอบนี้สัดส่วนตัวกรองต่อกากตะกอน รวมทั้งความชื้นในระบบ ยังต้องศึกษาในสภาวะที่เหมาะสมต่อไป ผลการทดสอบตัวกรองชีวภาพแบบฆ่าเชื้อและไม่ฆ่าเชื้อแสดงใน Table 2

Table 2 Removal efficiency of gasohol vapor.

Treatments	Total VOCs (mg/m^3)	% Removal Efficiency
Set 1 2 Biofiter Ratio 75 : 25 (Biofilter : Wastewater sludge)		
Control	2,832	
Non Sterilized Biofilter	2,605	8
Sterilized Biofilter	2,362	16.6
Set 2 Biofiter Ratio 70 : 30 (Biofilter : Wastewater sludge)		
Control	2,861	
Non Sterilized Biofilter	2,220	22.4
Sterilized Biofilter	1,864	34.9

ผลการทดสอบหาความชื้นจากสัดส่วนของตัวกรองชีวภาพ

ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการบำบัด ในการกรองชีวภาพ (Ranasinghe and Gostomski. 2003 ;Devinny *et al*.,1999) การปรับสัดส่วนตัวกรองต่อกากตะกอนมีผลการเปลี่ยนแปลงทั้งจำนวนจุลินทรีย์ สภาวะการบำบัดและความชื้น การบำบัดในการกรองชีวภาพความชื้นประมาณ ร้อยละ 40 ถึง 80 (Devinny *et al*.,1999) และความชื้นประมาณ ร้อยละ 40 ถึง 60 ในการบำบัดไอเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยการกรองชีวภาพ (Premkumar and Krishnamohan, 2012) และ ความชื้น ในการบำบัดไอระเหยไซลีนในการกรองชีวภาพ ประมาณ ร้อยละ 50 (Prachuabmorn and Panich, 2010) ผลการทดสอบความชื้นของตัวกรองชีวภาพ เปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการฆ่าเชื้อต่อกากตะกอนน้ำเสียที่อัตราส่วน 25 : 75, 30 : 70, 40 : 60, และ 50 : 50 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 29.5 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.8 – 7 พบว่า มีความชื้นเฉลี่ย ร้อยละ 25.4, 26.3, 34.2 และ 43.5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า สัดส่วนตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมในการบำบัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีความชื้นประมาณ ร้อยละ 40 ถึง 80 ได้แก่ อัตราของตัวกรองชีวภาพที่ 50 : 50 โดยปริมาตร ซึ่งมีความชื้นเฉลี่ย ร้อยละ 43.5 อยู่ในช่วงที่นำมาใช้ในการบำบัดต่อไป ผลความชื้นของตัวกรองดังแสดงใน Table 3

Table 3 Moisture content of biofilter.

Biofiter Ratio (Sterilized Peanut Shell : Wastewater Sludge)	pH	%Moisture Content
75:25	6.8-7	25.4
70:30	6.8-7	26.3
60:40	6.8-7	34.2
50:50	6.8-7	43.5

ผลการทดสอบการบำบัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายของน้ำมันเชื้อเพลิง

จากผลการทดสอบการบำบัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายของน้ำมันดีเซล โดยตัวกรองชีวภาพ เปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการฆ่าเชื้อ : กากตะกอนน้ำเสีย อัตราส่วน 50 : 50 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.8 – 7 พบว่า ชุดที่ 1 น้ำมันดีเซล ชุดควบคุมที่ 1 ซึ่งไม่มีตัวกรองชีวภาพในการกรอง มีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 156.7 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและชุดการทดลองซึ่งมีตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการฆ่าเชื้อเป็นตัวกรอง มีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 140.2 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรคิดเป็นการบำบัดไอระเหยน้ำมันดีเซล ร้อยละ 10.5 ชุดที่ 2 น้ำมันเบนซิน ชุดควบคุมที่ 2 ซึ่งไม่มีตัวกรองชีวภาพ มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 3,786 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและชุดการทดลองซึ่งมีตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการฆ่าเชื้อเป็นตัวกรองมีสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 1,120 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นการบำบัดไอระเหยน้ำมันเบนซิน ร้อยละ 70.4 ชุดที 3 ก๊าซโซฮอล์ พบว่า ชุดควบคุมที่ 3 มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 2,944 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและชุดการทดลองซึ่งมีตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการฆ่าเชื้อ มีค่าเท่ากับ 948 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะเห็นได้ว่า ชุดตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีประสิทธิภาพการบำบัดไอระเหยก๊าซโซฮอล์ ร้อยละ 67.8 ดังแสดงใน Table 4

Table 4 Removal efficiency of diesel, gasoline and gasohol Vapors.

Treatments	Total VOCs (mg/m^3)	% Removal Efficiency
Diesel Control	156.7	
Diesel Sterilized Biofilter	140.2	10.5
Gasoline Control	3,786	
Gasoline Sterilized Biofilter	1,120	70.4
Gasohol Control	2,944	
Gasohol Sterilized Biofilter	948	67.8

สรุป

จากผลการทดสอบการบำบัดไอระเหยจากน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยตัวกรองชีวภาพสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบการระเหยของน้ำมันเพลิงปริมาตร 1 มิลลิลิตร ในชุดการทดสอบขนาด 10x10x20 ซม. ในระยะเวลา 7 วัน ณ อุณหภูมิห้อง 29 องศาเซลเซียสพบว่า น้ำมันดีเซล มีระยะเวลาที่ระเหยหมด มากกว่า 7 วัน น้ำมันเบนซินและก๊าซโซฮอล์ ระเหยหมดในเวลา 2 วัน เนื่องจากน้ำมันดีเซลมีสภาพของแหลวมีการระเหยเป็นไอต่ำ ส่วนน้ำมันเบนซินและก๊าซโซฮอล์ มีการเปลี่ยนเป็นไอระเหยง่ายในภาวะอุณหภูมิปกติ

2. ผลการทดสอบตัวกรองชีวภาพในการบำบัดไอระเหยของก๊าซโซฮอล์ ที่อุณหภูมิ 28.5 องศาเซลเซียส สองชุดการทดลอง พบว่าการทดสอบทั้งสองชุดเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพเปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการฆ่าเชื้อ มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวกรองชีวภาพที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ แสดงว่าความร้อนจากการอบฆ่าเชื้อ (Autoclave) ทำให้สภาพตัวกรองมีโอกาสเพิ่มพื้นที่สัมผัสมากขึ้น กระบวนการดูดซับดีขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายไอระเหยได้มากขึ้น

3. ผลการทดสอบความชื้นของตัวกรองชีวภาพ เปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการฆ่าเชื้อต่อกากตะกอนน้ำเสียที่ตราส่วนอัตรา 25 : 75, 30 : 70, 40 : 60, และ 50 : 50 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 29.5 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.8 – 7 พบว่า สัดส่วนตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมในการบำบัดไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีความชื้นประมาณ ร้อยละ 40 ถึง 80 (Devinny *et al*.,1999; Premkumar and Krishnamohan. 2012) ได้แก่ อัตราของตัวกรองชีวภาพที่ 50 : 50 โดยปริมาตร ซึ่งมีความชื้นเฉลี่ย ร้อยละ 43.5 อยู่ในช่วงที่นำมาใช้ในการบำบัด

4. ผลการทดสอบการบำบัดไอระเหยสารอินทรีย์ระเหยง่ายของน้ำมันเชื้อเพลิง ในกล่องทดสอบ 7 วัน ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.8 – 7 โดยตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสม ได้แก่ เปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการฆ่าเชื้อ : กากตะกอนน้ำเสีย ในอัตราส่วน 50 : 50 โดยปริมาตร พบว่าการทดสอบน้ำมันดีเซล ชุดควบคุมซึ่งไม่มีตัวกรองชีวภาพวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ 156.7 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ชุดการทดลองหลังการบำบัดไอระเหยน้ำมันดีเซล มาวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 140.2 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

น้ำมันเบนซิน ชุดควบคุม มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 3,786 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและชุดการทดลองมีสารอินทรีย์ระเหยง่าย 1,120 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และก๊าซโซฮอล์ ชุดควบคุมมีสารอินทรีย์ระเหยง่าย 2,944 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและชุดการทดลอง มีค่าเท่ากับ 948 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการบำบัดไอระเหยก๊าซประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยจากน้ำมันเบนซินมากที่สุด รองลงมาเป็นก๊าซโซฮอล์ และ น้ำมันดีเซล โดยมีปริมาณไอระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงลดลง ร้อยละ 70.4 , 67.8 และ 10.5 ตามลำดับ สรุปได้ว่า ตัวกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพในการบำบัดไอระเหยของน้ำมันเบนซินและก๊าซโซฮอล์ได้ดีกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากน้ำมันดีเซลมีโครงสร้างและส่วนประกอบที่ยากต่อการระเหยกลายเป็นไอ การระเหยช้า มีสถานะเป็นของเหลวมากกว่าไอ ด้วยเหตุนี้จึงมีผลต่อการบำบัดไอระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยตัวกรองชีวภาพ เนื่องจากตัวกรองชีวภาพต้องดึงธาตุอาหาร ซึ่งได้แก่ ธาตุคาร์บอนจากไอระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิง ในสภาวะการทดลองนี้ยังไม่เหมาะสมต่อการบำบัดไอของน้ำมันดีเซล ดังนั้นควรทำการศึกษาสภาวะอื่น หรือการบำบัดน้ำมันดีเซลในสภาพของเหลว แทนการบำบัดไอระเหยของน้ำมันดีเซลต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

เกริก วงศ์สอนธรรม. 2549. **การบำบัดอากาศที่ปนเปื้อนเบนซีนโดยการกรองชีวภาพด้วยตัวกลางกรองเศษวัสดุเกษตรกรรม**. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ASTM D 2216. 1998. **Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil, Rock, and Soil-Aggregate Mixtures.**

Devinny, J.S., M.A. Deshusses, T.S.Webster. 1999. **Biofiltration for Air Pollution Control**. Boca Raton : Lewis Publishers, USA.

Lebrero, R., J.M. Estrada, R. Munoz and G. Quijano. 2014. Deterioration of organic packing materials commonly used in air biofiltration: effect of VOC-packing interactions. **Environ Manage** 14 1;137 : 93-100.

Prachuabmorn, A. and N.Panich. 2010. Isolation and Identification of Xylene Degrading Microorganisms from Biofilter. **Journal of Applied Sciences** 10 : 585-589.

Premkumar, R. and N.Krishnamohan. 2012. Effect of Secondary Parameters on Biofilter treating Industrial Effluent . **International Journal of PharmTech Research CODEN (USA)** 4 (3): 1279-1287.

Ramirez-Lopez E., J.Corona-Hernandez, L. Dendooven, P. Rangel and F. Thalasso. 2003. Characterization of five agricultural by-products as potential biofiltration carriers. **Bioresource technology** 88 : 259 - 263.

Ranasinghe, M.A. and P.A. Gostomski. 2003. A Novel Reactor for Exploring the Effect of water Content on Biofilter Degradation Rates **Environmental Progress** 22 (2): 103-109.

Roger, B., J. Nagashimam, M. Kelleym, M. Heskett and M. Rigby. 2013. Risk-based evaluation of total petroleum hydrocarbons in vapor intrusion studies. **Int. J Environ Res Public Health** 10(6): 2441–2467.

Sang-Hun, L., Congna Li, Albert J., and Heber . 2012. The effect of nitrate on ethylene biofiltration. **Original research Article Journal of Hazardous Materials** 331-339.

Sene L., A. Converti, M.G.A. Felipe and M. Zilli. 2002. Sugarcane bagasse as alternative packing material for biofiltration of benzene polluted gaseous streams: a preliminary study. **Bioresource technology** 83: 153 - 157.

คณะกรรมการฝ่ายวิชาการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กล้าณรงค์ ศรีรอต		ที่ปรึกษา
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดา อินทรวิชัย		ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิพันธ์ แก้วสมพงษ์		รองประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรวิช วรรณไกรโรจน์	ประธานสาขาพืช	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ประสานพานิช	ประธานสาขาสัตว์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.นริศ เต็งชัยศรี	ประธานสาขาสัตวแพทยศาสตร์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เทพ วิไลพันธ์	ประธานสาขาประมง	กรรมการ
ดร.ศศิประภา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต	ประธานสาขาส่งเสริมการเกษตร และคหกรรมศาสตร์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำไพ ทองธีรภาพ	ประธานสาขาวิทยาศาสตร์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติทวี ชูวงศ์โกมล	ประธานสาขาพันธุวิศวกรรม	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล คงคาฉุยฉาย	ประธานสาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขนิษฐา วัชราภรณ์	ประธานสาขาอุตสาหกรรมเกษตร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบศักดิ์ วันธงไชย	ประธานสาขาทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม	กรรมการ
ดร.พิกุล เอกวรางกูร	ประธานสาขาศึกษาศาสตร์	กรรมการ
ดร.หฤทัย นำประเสริฐชัย	ประธานสาขาเศรษฐศาสตร์และบริหารธุรกิจ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรนันท์ กลันทปุระ	ประธานสาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ประดนเดช นีละคุปต์	ประธานฝ่ายสารสนเทศ	กรรมการ
ดร.นีรนุช ภาชนะทิพย์	ประธานฝ่ายสูจิบัตรและฝ่ายเลขานุการ	กรรมการ
นายจรูญศักดิ์ สวนสวรรค์	ประธานฝ่ายจัดพิมพ์เอกสาร	กรรมการ
นางสาวอุทัยวรรณ กิจวิเชียร		กรรมการและเลขานุการ
นางมัลลิกา เกตุชรารัตน์		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวยลรวิวรร วิบูรณวงศ์		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวสุดธิดา มีสวัสดิ์		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวทิพวรรณ เขม้นกิจ		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
นางสาวพิชชาอรจุ์ สิริชีวเกษร		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ
นายวิวัฒน์ น้าวานิช		กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์ : ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1.	ดร.จรรยา เจตนาเสน	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
2.	ดร.ไพบูลย์ เงินมีศรี	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
3.	ผศ.ดร.ธิตินันท์ กาพย์เกิด	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
4.	ดร.ปณิทัต หาสิน	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
5.	รศ.ดร.ฆรณี ตุ้ยเต็มวงศ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
6.	ผศ.ดร.วรรณา มาลาพันธุ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
7.	รศ.ดร.วิเชียร กิจปรีชาวนิช	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
8.	ผศ.ดร.กรรณิการ์ ดวงมาลย์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
9.	ผศ.ดร.นันทนา สีสุข	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
10.	ผศ.ดร.อิงอร กิมกง	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
11.	ดร.ราตรี วงศ์ปัญญา	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
12.	ผศ.ดร.โชติกา หยกทองวัฒนา	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
13.	ผศ.ดร.ศศิมนัส อุณจักร์	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
14.	ผศ.ดร.ชลธิชา ตันติธาดาพิทักษ์	ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
15.	รศ.ดร.สรัญญา วัชโรทัย	ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
16.	ผศ.เฉลิมพล สุวรรณภักดี	ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
17.	ผศ.ดร.สมพิศ สามิภักดิ์	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
18.	ผศ.ดร.ชัชวาล จันทราสุริยารัตน์	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
19.	ผศ.ดร.อุไรวรรณ อรัญวาสน์	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
20.	ผศ.ดร.วิภา หงษ์ตระกูล	ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
21.	ดร.อภิชาติ พัฒนโภครัตนา	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
22.	ผศ.ดร.จิรโรจน์ ต.เทียนประเสริฐ	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
23.	ผศ.ดร.จิรศักดิ์ วงศ์เอกบุตร	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
24.	ผศ.ดร.ศิริกาญจนา ทองมี	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
25.	ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
26.	ผศ.ดร.วัชรี รัตนสกุลทอง	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
27.	ดร.สุโกสินทร์ ทองรัตนาศิริ	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
28.	ผศ.ดร.บำเหน็จ สุดชมโฉม	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

29. รศ.ดร.สุธี บุญช่วย	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
30. ดร.นพฤทธิ์ สมบูรณ์กิตติชัย	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
31. ดร.มานิตย์ จิตรภักดี	ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์
32. ผศ.ดร.วันวิสา สุดประเสริฐ	ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์
33. ผศ.นฤปวัจน์ เงินวิจิตร	ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์
34. รศ.พรรณี พักคง	ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์
35. ดร.เสรี พงศ์พันธุ์ภาณี	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
36. ดร.ณัฐสมน เพชรแสง	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
37. รศ.ดร.อรรถธีรา วรยิ่งยง	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
38. ดร.จันทิกา ชูโชติรส	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
39. ผศ.ดร.มาริสา อรัญชัยยะ	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
40. ดร.พิมสิรี สุวรรณะ	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
41. ดร.กัญน์นรี ช่วงฉ่ำ	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
42. ดร.ประหยัด นันทศีล	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
43. อ.พงศกร จิวาภรณ์คุปต์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
44. ผศ.ดร.ภาสกร ปนานนท์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์
45. ผศ.ดร.บุญอ้อม โฉมที	ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
46. ผศ.ดร.อำไพ ทองธีรภาพ	ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
47. ผศ.ดร.ลี่ลี อิงศรีสว่าง	ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
48. ดร.มีนา ปทุมสูตร	ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์
49. รศ.ดร.วิน เชยชมศรี	ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
50. ดร.นิตยา สมทรัพย์	ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

Editorial Board

Subject : Science (internal)

1. Dr.Junya Jettanasen
2. Dr.Paiboon Ngernmeesri
3. Asst.Prof.Dr.Thitinun Karpkird
4. Dr.Panitat Hasin
5. Assoc.Prof.Dr.Kooranee Tuitemwong
6. Asst.Prof.Dr.Wanna Malaphan
7. Assoc.Prof.Dr.Vichien Kitpreechavanich
8. Asst.Prof.Dr.Kannika Duangmal
9. Asst.Prof.Dr.Nantana Srisuk
10. Asst.Prof.Dr.Ingorn Kimkong
11. Dr.Ratree Wongpanya
12. Asst.Prof.Dr.Chotika Yokthongwattana
13. Asst.Prof.Dr.Sasimanas Unajak
14. Asst.Prof.Dr.Chonticha Tantitadapitak
15. Assoc.Prof.Dr.Srunya Vajrodaya
16. Asst.Prof.Chalermpol Suwanphakdee
17. Asst.Prof.Dr.Sompid Samipak
18. Asst.Prof.Dr.Chatchawan Jantrasuriyarat
19. Asst.Prof.Dr.Uraiwan Arunyawat
20. Asst.Prof.Dr.Vipa Hongtrakul
21. Dr.Apichart Pattanaporkratana
22. Asst.Prof.Dr.Jiraroj T.Thienprasert
23. Asst.Prof.Dr.Jirasak Wong-ekkabut
24. Asst.Prof.Dr.Sirikanjana Thongmee
25. Asst.Prof.Dr.Surasak Chiangga
26. Asst.Prof.Dr.Watcharee Rattanasakulthong
27. Dr.Sukosin Thongrattanasiri
28. Asst.Prof.Dr.Bumned Soodchomshom
29. Assoc.Prof.Dr.Sutee Boonchui
30. Dr.Nopparit Somboonkittichai
31. Dr.Manit Jitpukdee
32. Asst.Prof.Dr.Wanwisa Sudprasert
33. Asst.Prof.Narippawaj Ngernvijit
34. Assoc.Prof.Pannee Pakkong
35. Dr.Saree Phongphanphanee
36. Dr.Nattasamon Petchsang
37. Assoc.Prof.Dr.Attera Worayingyong
38. Dr.Chantiga Choochottiros
39. Asst.Prof.Dr.Marisa Arunchaiya
40. Dr.Pimsiree Suwanna
41. Dr.Kannaree Chuangcham
42. Dr.Prayath Nantasin
43. Mr.Pongsakorn Jiwapornkupt
44. Asst.Prof.Dr.Passakorn Pananont
45. Asst.Prof.Dr.Boonorm Chomtee
46. Asst.Prof.Dr.Ampai Tongteeraparp
47. Asst.Prof.Dr.Lily Ingsrisawang
48. Dr.Mena Patummasut
49. Assoc.Prof.Dr.Win Chaeychomsri
50. Dr.Nittaya Somsap

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาพันธุวิศวกรรม : ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. ดร.อรไท สวัสดิชัยกุล ฝ่ายโภชนาการและสุขภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
2. ผศ.ดร.ศศิมนัส อุณจักร ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์
3. ผศ.ดร.อัญชณี คูเบอร่า ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาพันธุวิศวกรรม : ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ดร.ณภัทร สองทวี คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล

Editorial Board

Subject : Genetic Engineering (internal)

1. Dr.Orathai Sawatdichaikul
2. Asst.Prof.Dr.Sasimanas Unajak
3. Asst.Prof.Dr.Anchanee Kubera

Subject : Genetic Engineering (external)

1. Dr.Napat Songtawee

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1.	ผศ.ดร.เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
2.	ผศ.ดร.มนต์ทิพย์ ช่ำชอง	ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
3.	ผศ.ดร.สุกัญญา วิชชุกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
4.	ดร.อมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร	ภาควิชาวิศวกรรมการอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
5.	รศ.ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
6.	ดร.วันรัฐ อับดุลลากาซิม	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
7.	ดร.ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
8.	รศ.ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
9.	ดร.อาทิตย์ พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
10.	ดร.กิตติพงษ์ เจาจารึก	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
11.	รศ.ดร.เวชพงศ์ ชุติชูเดช	ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
12.	ผศ.ดร.เอกไท วิโรจน์สกุลชัย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
13.	ผศ.ดร.ชัยยากร จันทร์สุวรรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
14.	ผศ.ดร.ธเนศ อรุณศรีโสภณ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
15.	ผศ.ดร.ประพจน์ ขุนทอง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
16.	ผศ.ดร.พิพล บุญจันต๊ะ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
17.	ดร.ฤทธิพล จันทราษฎร์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
18.	ดร.กาญจนพันธุ์ สุขวิชชัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
19.	ผศ.ดร.ดุสิต ธนเพทาย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
20.	ผศ.ดร.ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
21.	ดร.วรดร วัฒนพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
22.	รศ.ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
23.	รศ.ดร.สมหญิง ไทยนิมิต	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
24.	รศ.ชัยวัฒน์ ขยันการนาวี	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
25.	ผศ.สุรชัย ลิปิวัฒนาการ	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์
26.	ผศ.ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
27.	ดร.ยุรนันท์ หาญล้ำยวง	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
28.	ดร.รติพร มั่นพรหม	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

29. ผศ.ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
30. ผศ.ดร.นันทชัย กานตานันทะ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
31. รศ.ดร.พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
32. ดร.สุวิชภรณ์ วิชกูล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
33. ดร.ปวีนา ประไพนัยนา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
34. ดร.ภีรพรรณ ดิษฐเนตร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
35. ผศ.ดร.พัชราพร ฤกษ์หร่าย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
36. รศ.ดร.ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
37. รศ.ดร.วิไล เจียมไชยศรี ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
38. รศ.ดร.วินัย เลียงเจริญสิทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
39. ผศ.ดร.วราเมศวร์ วิเชียรแสน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
40. ผศ.ดร.ธนภณ พันธเสน สาขาวิชาการวางผังเมืองและสภาพแวดล้อม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
41. ดร.ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์ สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์: ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ผศ.ดร.กฤษฎา วรรณทอง บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)
2. ดร.อัศวิน สาลี บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)
3. ดร.สมนึก จรูญจิตเสถียร ฝ่ายเทคนิคพลังงานประยุกต์และเครื่องยนต์ทดสอบ สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)
4. น.ท.รศ.ดร.โอฐศิลป์ นิลุบล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
5. ดร.กระวี ตรีอำนรรค ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
6. ผศ.ดร.ชนาธิป สามารถ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
7. รศ.ดร.อุรุยา วีสกุล กรรมการสภามหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
8. ดร.ยศวีร์ วีระกำแหง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
9. รศ.ดร.ณชล ไชยรัตนะ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

10. ผศ.ดร.นุชรินทร์ ทิพยวรรณากร ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
11. ผศ.ดร.ปริญญา คงพรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
12. รศ.ดร.ธำรงรัตน์ อมรรักษา ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
13. ดร.อมร จิรเสรีอมรกุล ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็คทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
14. ศ.ดร.สำเริง จักรใจ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
15. รศ.ดร.สร้อยดาว วินิจนันทรัตน์ สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม และวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
16. ดร.อนวัช พินิจศักดิ์กุล ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
17. ดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
18. ดร.สุมนมาลย์ เนียมหลาง ภาควิชาวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
19. ดร.วรวรรธน์ นาคะวิโร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
20. ดร.วรุตม์ สูอำพัน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
21. ดร.ปัญญาวัชร์ วังยาว ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
22. ดร.ปาจรีย์ ถาวรนิติ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
23. ดร.วนัฐฌพงษ์ คงแก้ว คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
24. ผศ.ดร.รุ่ง กิตติพิชัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

Editorial Board

Subject: Architecture and Engineering (internal)

1. Asst.Prof.Dr.Chouw Inprasit
2. Asst.Prof.Dr.Montip Chamchong
3. Asst.Prof.Dr.Sukanya Wichchukit
4. Dr.Amorndej Puttipipatkajorn
5. Assoc.Prof.Dr.Prathuang Usaborisut
6. Dr.Wanrat Abdullakasim
7. Dr.Sirisak Chertkiattipol
8. Assoc.Prof.Dr.Anupun Terdwongworakul
9. Dr.Arthit Phuangsombut
10. Dr.Kitipong Jaojaruek
11. Assoc.Prof.Dr.Vejapong Juttijudata
12. Asst.Prof.Dr.Ekathai Wirojsakunchai
13. Asst.Prof.Dr.Chaiyakorn Jansuwan
14. Asst.Prof.Dr.Tanet Aroonsrisopon
15. Asst.Prof.Dr.Prapot Kunthong
16. Asst.Prof.Dr.Pipon boonjanta
17. Dr.Rittipol Chantarat
18. Dr.Kanjanapan Sukvichai
19. Asst.Prof.Dr.Dusit Thanapatay
20. Asst.Prof.Dr.Teerasit Kasetkasem
21. Dr.Woradorn Wattanapanitch
22. Assoc.Prof.Dr.Siriroj Sirisukprasert
23. Assoc.Prof.Dr.Somying Thainimit
24. Assoc.Prof.Dr.Chaiwat Kayankarnnavy
25. Asst.Prof.Dr.Surachai Lipiwattanakam
26. Asst.Prof.Dr.Duangrudee Chaysuwan
27. Dr.Yuranan Hanlumyuang
28. Dr.Ratiporn Munprom
29. Asst.Prof.Dr.Ratchatee Techapiesancharoenkij
30. Asst.Prof.Dr.Nantachai Kantanantha
31. Assoc.Prof.Dr.Peerayuth Charnsethikul
32. Dr.Suwitchaporn Witchakul
33. Dr.Paweena Parpainainar
34. Dr.Peerapan Dittanet
35. Asst.Prof.Dr.Patcharaporn Rerkrai
36. Assoc.Prof.Dr.Patcharaporn Suwanvitaya
37. Assoc.Prof.Dr.Wilai Chiemchaisri
38. Assoc.Prof.Dr.Winai Liengcharernsit
39. Asst.Prof.Dr.Varameth Vichiensan
40. Asst.Prof.Dr.Tanapon Panthasen
41. Dr.Parames Kamhangrittirong

Subject: Architecture and Engineering (external)

1. Asst.Prof.Dr.Krisada Wannatong
2. Dr.Atsawin Salee
3. Dr.Somnuek Jaroonjitsathian
4. Assoc.Prof.Dr.Othasin Nilubol
5. Dr.Krawee Treeamnuk
6. Asst.Prof.Dr.Chanatip Samart
7. Assoc.Prof.Dr.Uruya Weesakul
8. Dr.Yossawee Weerakamhaeng
9. Assoc.Prof.Dr.Nachol Chaiyaratana
10. Asst.Prof.Dr.Noocharin Tippayawannakorn

11. Asst.Prof.Dr.Parinya Khongprom
12. Assoc.Prof.Dr.Thumrongrat Amornraksa
13. Dr.Amorn Jiraseree-amornkun
14. Prof.Dr.Sumrerng Jugjai
15. Assoc.Prof.Dr.Soydoa Vinitnantharat
16. Dr.Anawat Pinisakul
17. Dr.Narongchai O-Charoen
18. Dr.Sumonman Niamlang
19. Dr.Worawat Nakawiro
20. Dr.Warut Suampun
21. Dr.Panyawat Wangyao
22. Dr.Parjaree Thavorniti
23. Dr.Wanatchapong Kongkaew
24. Asst.Prof.Dr.Rung Kittipichai

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร : ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1.	ผศ.ดร.สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ	ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร
2.	ดร.ศิริพร เรียบร้อย	ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร
3.	ผศ.ดร.ธานี ศรีวงศ์ชัย	ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร
4.	ผศ.ดร.พงษ์เทพ วิไลพันธ์	ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง
5.	รศ.ดร.กมลวรรณ แจ้งชัด	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
6.	รศ.ดร.หทัยรัตน์ ริมคีรี	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
7.	รศ.ดร.รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
8.	รศ.ดร.เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
9.	รศ.ดร.อนุวัตร แจ้งชัด	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
10.	ผศ.ดร.ทานตะวัน พิรักษ์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
11.	ดร.เทพกัญญา หาญศีลวัต	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
12.	ผศ.ดร.ปิติพร ฤทธิเรืองเดช	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
13.	ผศ.ดร.วลัยรัตน์ จันทรปานนท์	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
14.	ดร.วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
15.	ดร.ศิวาพร โอเจริญ	ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
16.	รศ.ดร.วาณี ชนเห็นชอบ	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
17.	ผศ.ดร.ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
18.	ผศ.ดร.ธาริณี นามพิชญ์	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
19.	ผศ.ดร.รังรอง ยกส้าน	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
20.	ผศ.ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
21.	ผศ.ดร.อำพร เสน่ห์	ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
22.	รศ.ดร.กล้าณรงค์ ศรีรอต	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
23.	รศ.ดร.เพ็ญแข วันไชยธนวงศ์	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
24.	รศ.ดร.มังกร โรจน์ประภากร	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
25.	รศ.ดร.สาโรจน์ ศิริศันสนียกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
26.	รศ.ดร.สาวิตรี จันทรานุรักษ์	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
27.	รศ.ดร.สุนีย์ นิธิสินประเสริฐ	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
28.	ผศ.ดร.ภคมน จิตประเสริฐ	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

29. ดร.กิติพงษ์ รัตนาภรณ์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
30. ดร.วิลาวัลย์ สินธุประภา ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
31. ดร.สุมัลลิกา โมรากุล ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
32. ดร.อุลัยวรรณ์ อุสันสา ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
33. รศ.ดร.ธนโชติ บุญวรโชติ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
34. ผศ.ดร.ธนิต พุทธพงษ์ศิริพร ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
35. ผศ.ดร.ปรารถนา ปรารถนาดี ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
36. ดร.กฤษณา ตรีศีลวัฒนกุล ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
37. ดร.จุมพล วรสายัณห์ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
38. ดร.อัจฉรา เกษสุวรรณ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
39. ดร.อภิชญา ลีลาวณิชกุล ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
40. รศ.ดร.วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
41. รศ.ดร.สงวนศรี เจริญเหรียญ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
42. ผศ.ดร.วรรณี จิรภาคย์กุล ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
43. ผศ.ดร.วราภา มหากาญจนกุล ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
44. ผศ.ดร.สุดสาย ตรีวานิช ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
45. ผศ.ดร.อุทัย กลิ่นเกษร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
46. ดร.กนกรัตน์ ลิมปิโสภณ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
47. ดร.กนิฐพร วังใน ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
48. ดร.กฤษกมล ณ จอม ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
49. ดร.กุลนาถ ทองขาว ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
50. ดร.ปัทธิมา อุดมไพจิตรกุล ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
51. ดร.ปิติยา กมลพัฒนะ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
52. ดร.เยาวภา หล่อเจริญผล ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
53. ดร.วศะพร จันทร์พุฒ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
54. ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
55. ผศ.ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
56. ผศ.ดร.จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์ ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
57. ผศ.ขนิษฐา วัชราภรณ์ ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
58. ดร.พรทิพย์ แซ่เบ๊ ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
59. อ.ณัฐดนย์ รุ่งเรืองกิจไกร ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

60. อ.ผุสดี แซ่ลิ่ม	ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
61. น.ส.ประจงเวท สาตมาลี	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
62. ดร.เนตรนภิส วัฒนสุชาติ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
63. ดร.วันเพ็ญ มีสมญา	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
64. ดร.วิชชา ตรีสุวรรณ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
65. ดร.วิภาภรณ์ ณ ถลาง	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
66. ดร.ศันสนีย์ อุดมระติ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
67. ดร.สร้อยทอง สายหยุดทอง	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
68. ดร.สุมิตรา บุญบำรุง	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
69. ดร.หทัยชนก กันตรง	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
70. ดร.อรไท สวัสดิชัยกุล	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
71. ดร.อัญชลี อุษณาสุวรรณกุล	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
72. นางจุฬาลักษณ์ จารุนุช	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
73. นางชิดชม ฮิรางะ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
74. นายนิพัฒน์ ลิ้มสงวน	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
75. น.ส.วราภรณ์ ประเสริฐ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
76. น.ส.อภิญญา จุฑางกูร	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
77. ดร.ณัฐภรณ์ สุทธิวิจิตรภักดี	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
78. ดร.พิลาณี ไวถนอมสัตย์	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
79. ดร.รังสิมา ชลคุป	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
80. ดร.รัตนา ตันฑเทอดธรรม	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
81. ดร.ศิริลักษณ์ เลี้ยงประยูร	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
82. ดร.ศุมาพร เกษมสำราญ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
83. ดร.สุพนิดา วินิจฉัย	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
84. ดร.สุคันธรส ธาดากิตติสาร	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
85. ดร.สุธีรา วิทยากาญจน์	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
86. ดร.อันธิกา บุญแดง	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
87. ดร.อุดมลักษณ์ สุขอัตตะ	สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร

สาขาอุตสาหกรรมเกษตร : ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1.	ผศ.สุขเกษม สิทธิพจน์	ข้าราชการบำนาญ
2.	รศ.ดร.วิเชียร ลีลาวัชรมาศ	ข้าราชการบำนาญ
3.	รศ.ดร.เพ็ญขวัญ ชมปรีดา	ข้าราชการบำนาญ
4.	รศ.ดร.วิชัย หฤทัยธนาสันติ์	ข้าราชการบำนาญ
5.	ผศ.ดร.ไพศาล วุฒิจำนงค์	ข้าราชการบำนาญ
6.	รศ.ดร.สุคนธ์ชื่น ศรีงาม	ข้าราชการบำนาญ
7.	รศ.มยุรี จัยวัฒน์	ข้าราชการบำนาญ
8.	รศ.ดร.สมจิต สุรพัฒน์	ข้าราชการบำนาญ
9.	นางเพ็ญพิมล จาตุรนต์รัศมี	ข้าราชการบำนาญ
10.	รศ.ดร.กัลยา เลาหสงคราม	ข้าราชการบำนาญ
11.	ผศ.ดร.พาสวดี ประทีปะเสน	ข้าราชการบำนาญ
12.	ผศ.ดร.รมณี สงวนดีกุล	ข้าราชการบำนาญ
13.	รศ.ดร.เข็มชัย เหมะจันทร	ข้าราชการบำนาญ
14.	ผศ.ดร.คณิต วิชิตพันธุ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
15.	ผศ.ดร.จิรวรรณ อภิรักษากร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
16.	ผศ.สุกานดา วิชิตพันธุ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
17.	ดร.กรกช ฮามสุโพธิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
18.	ผศ.ดร.วิชัย ลีลาวัชรมาศ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
19.	ศ.ดร.ปราณี อ่านเปรื่อง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
20.	รศ.ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
21.	รศ.ดร.สุเมธ ตันตระเธียร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
22.	ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
23.	ผศ.ดร.ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
24.	ดร.กิติพงศ์ อัศตรกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
25.	ดร.ดริษ กวักเพฑูรย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
26.	ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
27.	ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
28.	ดร.อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
29.	ผศ.ดร.สีหนาท ประสงค์สุข	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
30.	รศ.ดร.สมพงษ์ ศิริโสภณศิลป์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

31. รศ.ดร.นิรมล อุตมอ่าง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
32. รศ.ดร.อภิรักษ์ เพียรมงคล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
33. รศ.ดร.สรรพสิทธิ์ กล่อมเกล้า	มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
34. ผศ.ดร.วิไลลักษณ์ กล่อมพงษ์	มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
35. ดร.พรพิมล มะยะเฉียว	มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
36. ดร.รัทรดา สมพงษ์	มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
37. ผศ.ดร.ดิสนีย์ สิงหวรเศรษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
38. ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
39. รศ.ดร.ธนัญญา วสุศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
40. ผศ.ดร.ชุมพล มณฑาทิพย์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
41. ศ.ดร.สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
42. รศ.ดร.อัมพวัน ตั๊นสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
43. ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
44. รศ.ดร.ประเวทย์ ตุ้ยเต็มวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
45. รศ.ดร.วิไล รังสาดทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
46. รศ.ดร.อมรรัตน์ มุขประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
47. ผศ.ดร.กมลทิพย์ สัจจาอนันตกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
48. ผศ.ดร.รัชนี เจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี
49. ผศ.ดร.วรรณทิชา เศวตบวร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี
50. รศ.ดร.จิรวัฒน์ ยงสวัสดิกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
51. ผศ.ดร.ปิยะวรรณ กาสลัก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
52. ผศ.ดร.ศิวัฒ ไทยอุดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
53. รศ.ดร.สอาด ริยะจันทร์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
54. รศ.ดร.วรางคณา สมพงษ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
55. ผศ.ดร.บุศราภา ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
56. ผศ.ดร.สมโภช พจนพิมล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
57. ดร.วิไลลักษณ์ ชัยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
58. ดร.สุธีรา วัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
59. ผศ.ดร.ปริตา ธนสุกาญจน์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
60. ผศ.ดร.ศจี สุวรรณศรี	มหาวิทยาลัยนเรศวร
61. ผศ.ดร.อรอินทุ์ ประไชโย	มหาวิทยาลัยนเรศวร

62. รศ.ดร.วิสิฐ จะวะสิต	มหาวิทยาลัยมหิดล
63. ดร.จารุภัทร ลือชา	มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี
64. ผศ.ดร.เอกชัย ชูเกียรติโรจน์	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
65. ผศ.ดร.สาโรจน์ รอดคืน	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
66. ดร.ปิยาภรณ์ เชื่อมชัยตระกูล	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
67. ดร.สิริรุ่ง วงศ์สกุล	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
68. ผศ.ดร.สุภาณี ด่านวิริยะกุล	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
69. รศ.อรไท สุขเจริญ	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
70. รศ.ดร.มนัส ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
71. ผศ.ดร.วรวรรณ พันพิพัฒน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
72. ดร.กมลชัย ชะเอม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
73. ผศ.ดร.บุศรินทร์ เฆษะปะบุตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
74. ผศ.ดร.ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
75. ผศ.ดร.ปริญดา เพ็ญโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
76. รศ.มาณพ ปานะโปย	มหาวิทยาลัยศิลปากร
77. ผศ.ดร.ธรรมนูญ โปรดปราน	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
78. ผศ.ดร.ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
79. ผศ.ดร.พิทยา อดุลยธรรม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
80. ผศ.ดร.มุทิตา มีนุ่น	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
81. รศ.ดร.ศุภศิลป์ มณีรัตน์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
82. รศ.ดร.เถวียน วิทยา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
83. รศ.ดร.วรัญญู ศรีเดช	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
84. ผศ.ดร.ศุภชัย ภิสัชเพ็ญ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
85. ผศ.ดร.สันทัด วิเชียรโชติ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
86. ผศ.ดร.พิชญอร ไหมสุทธิสกุล	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
87. ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ อ่อนสอาด	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
88. ผศ.ดร.คมแข พิลาสมบัติ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
89. รศ.ดร.วลัยลักษณ์ อัตธีรวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
90. รศ.ดร.วรรณา ตั้งเจริญชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
91. รศ.ดร.อดิศร เสวตวิวัฒน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

92. ดร.เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
93. นายสมชาย ทรงศักดิ์เดชา	บริษัท ธนูลักษณ์ จำกัด (มหาชน)

Editorial Board

Subject : Agro-Industry (internal)

1. Asst.Prof.Dr.Suteeluk Kraisuwan
2. Dr. Siriporn Riebroy
3. Asst.Prof.Dr.Tanee Sreewongchai
4. Asst.Prof.Dr.Pongtep Wilaipun
5. Assoc.Prof.Dr.Kamolwan Jangchud
6. Assoc.Prof.Dr.Hathairat Rimkeeree
7. Assoc.Prof.Dr.Rungnaphar Pongsawatmanit
8. Assoc.Prof.Dr.Saowanee Lertworasirikul
9. Assoc.Prof.Dr.Anuvat Jangchud
10. Asst.Prof.Dr.Tantawan Pirak
11. Dr.Thepkunya Harnsilawat
12. Asst.Prof.Dr.Pitiporn Ritthiruangdej
13. Asst.Prof.Dr.Walairut Chantarapanont
14. Dr.Wannasawat Ratphitagsanti
15. Dr.Siwaporn O'Charoen
16. Assoc.Prof.Dr.Vanee Chonhenchob
17. Asst.Prof.Dr.Tunyarut Jinkarn
18. Asst.Prof.Dr.Tarinee Nampitch
19. Asst.Prof.Dr.Rangrong Yoksan
20. Asst.Prof.Dr.Lerpong Jarupan
21. Asst.Prof.Dr.Amporn Sane
22. Assoc.Prof.Dr.Klanarong Sriroth
23. Assoc.Prof.Dr.Penkhae Wanchaitanawong
24. Assoc.Prof.Dr.Mangkorn Rodprapakorn
25. Assoc.Prof.Dr.Sarote Sirisansaneeyakul
26. Assoc.Prof.Dr.Sawitri Chuntranuluck
27. Assoc.Prof.Dr.Sunee Nitisinprasert
28. Asst.Prof.Dr.Pakamon Chitprasert
29. Dr.Kittipong Rattanaporn
30. Dr.Wilawan Sintuprapa
31. Dr.Sumallika Morakul
32. Dr.Ulaiwan Usansa
33. Assoc.Prof.Dr.Tanachote Boonvorachote
34. Asst.Prof.Dr.Thanit Puthpongsiriporn
35. Asst.Prof.Dr.Parthana Parthanadee
36. Dr.Krissana Treesilvattanakul
37. Dr.Jumpol Vorasayun
38. Dr.Ajchara Kessuvan
39. Dr.Apichaya Lilavanichakul
40. Assoc.Prof.Dr.Waraporn Boonsupthip
41. Assoc.Prof.Dr.Sanguansri Charoenrein
42. Asst.Prof.Dr.Wannee Jirapakkul
43. Asst.Prof.Dr.Warapa Mahakarnchanakul
44. Asst.Prof.Dr.Sudsai Trevanich
45. Asst.Prof.Dr.Utai Klinkesorn
46. Dr.Kanokrat Limpisophon
47. Dr.Kanithaporn Vangnai
48. Dr.Kriskamol Na Jom
49. Dr.Kullanart Tongkhao
50. Dr.Pathima Udompijitkul
51. Dr.Pitiya Kamonpatana
52. Dr.Yaowapa Lorjaroenphon
53. Dr.Wasaporn Chanput
54. Dr.Sirichai Songsermpong
55. Asst.Prof.Dr.Kornthip Watcharapanyawong Techametheekul

56. Asst.Prof.Dr.Jantip Setthayanond
57. Asst.Prof.Kanitta Watcharaporn
58. Dr.Porntip Sae-bae
59. Mr.Nattadon Rungruangkitkrai
60. Mrs.Phussadee Lim
61. Miss Prajongwate Satmalee
62. Dr.Nednapis Vatanasuchart
63. Dr.Wanpen Mesomya
64. Dr.Witcha Treesuwan
65. Dr.Vipaporn Na Thalang
66. Dr.Sunsanee Udomrati
67. Dr.Soithong Saiyudthong
68. Dr.Sumitra Boonbumrung
69. Dr.Hataichanok Kantrong
70. Dr.Orathai Sawatdichaikul
71. Dr.Aunchalee Aussanasuwannakul
72. Mrs Chulaluck Charunuch
73. Mrs.Chidchom Hiraga
74. Mr.Nipat Limsangouan
75. Miss Waraporn Prasert
76. Miss Apinya Chudhangkura
77. Dr.Nattaporn Suttiwijitpukdee
78. Dr.Pilanee Vaithanomsat
79. Dr.Rungsima Chollakup
80. Dr.Rattana Tantatherdtam
81. Dr.Siriluck Liengprayoon
82. Dr.Sumaporn Kasemsumran
83. Dr.Supanida Winitchai
84. Dr.Sukuntaros Tadakittisarn
85. Dr.Suteera Witayakran
86. Dr.Antika Boondaeng
87. Dr.Udomlak Sukatta

Subject : Agro-Industry (external)

1. Asst.Prof.Sukasem Sittipod
2. Assoc.Prof.Dr.Vichien Leelawatcharamas
3. Assoc.Prof.Dr.Penkwan Chompreeda
4. Assoc.Prof.Dr.Vichai Haruthaithanasan
5. Asst.Prof.Dr.Phaisan Wuttijumnong
6. Assoc.Prof.Dr.Sukoncheun Sringam
7. Assoc.Prof.Mayuree Chaiyawat
8. Assoc.Prof.Dr.Somjit Surapat
9. Mrs.Penpimol Jaturontrasame
10. Assoc.Prof.Dr.Kalaya Laohasongkram
11. Asst.Prof.Dr.Pasawadee Pradipasena
12. Asst.Prof.Dr.Romanee Sanguandeekul
13. Assoc.Prof.Dr.Khemchai Hemachandra
14. Asst.Prof.Dr.Kanit Vichitphan
15. Asst.Prof.Dr.Jirawan Apiraksakorn
16. Asst.Prof.Sukanda Vichitphan
17. Dr.Korakoch Hamsupo
18. Asst.Prof.Dr.Vichai Leelavatcharamas
19. Prof.Dr.Pranee Anprung
20. Assoc.Prof.Dr.Jirarat Anuntagool
21. Assoc.Prof.Dr.Sumate Tantratian
22. Asst.Prof.Dr.Kiattisak Duangmal
23. Asst.Prof.Dr.Chaleeda Borompichaichartkul
24. Dr.Kitipong Assatarakul
25. Dr.Daris Kuakpetoon
26. Dr.Thanachan Mahawanich

27. Dr.Sirima Puangpraphant
28. Dr.Inthawoot Suppavorasatit
29. Asst.Prof.Dr.Sehanat Prasongsuk
30. Assoc.Prof.Dr.Sompong Sirisoponsilp
31. Assoc.Prof.Dr.Niramon Utama-ang
32. Assoc.Prof.Dr.Aphirak Phianmongkbol
33. Assoc.Prof.Dr.Sappasith Klomklao
34. Asst.Prof.Dr.Vilailak Klompong
35. Dr.Pornpimon Mayachiew
36. Dr.Rutrada Sompong
37. Asst.Prof.Dr.Disney Singhawuarasate
38. Dr.Rattanaphol Mongkholrattanasit
39. Assoc.Prof.Dr.Thananya Wasusri
40. Asst.Prof.Dr.Chumpol Monthatipkul
41. Prof.Dr.Sakamon Devahastin
42. Assoc.Prof.Dr.Ampawan Tansakul
43. Asst.Prof.Dr.Charoenchai Khompatraporn
44. Assoc.Prof.Dr.Pravate Tuitemwong
45. Assoc.Prof.Dr.Vilai Rungsardthong
46. Assoc.Prof.Dr.Amornrat Mukprasirt
47. Asst.Prof.Dr.Kamontip Sajjaanantakul
48. Asst.Prof.Dr.Ratchanee Charoen
49. Asst.Prof.Dr.Wanticha Savedboworn
50. Assoc.Prof.Dr.Jirawat Yongsawatdigul
51. Asst.Prof.Dr.Piyawan Gasaluck
52. Asst.Prof.Dr.Siwatt Thaiudom
53. Assoc.Prof.Dr.Sa-Ad Riyajan
54. Assoc.Prof.Dr.Warangkana Sompongse
55. Asst.Prof.Dr.Bootsrapa Leelawatr
56. Asst.Prof.Dr.Sompoche Pojjanapimol
57. Dr.Wilailuk Chaiyasit
58. Dr.Suteera Vatthanakul
59. Asst.Prof.Dr.Parita Thanasukarn
60. Asst.Prof.Dr.Sajee Suwansri
61. Asst.Prof.Dr.Onin Prachaiyo
62. Assoc.Prof.Dr.Visith Chavasit
63. Dr.Jarupat Luecha
64. Asst.Prof.Dr.Ekachai Chukeatirote
65. Asst.Prof.Dr.Saroat Rawdkuen
66. Dr.Piyaporn Chueamchaitrakun
67. Dr.Sirirung Wongsakul
68. Asst.Prof.Dr.Supanee Danviriyakul
69. Assoc.Prof.Oratai Sukcharoen
70. Assoc.Prof.Dr.Manat Chaijan
71. Asst.Prof.Dr.Worawan Punpipat
72. Dr.Kamonchai Cha-aim
73. Asst.Prof.Dr.Bussarin Ksapabutr
74. Asst.Prof.Dr.Prasong Siriwongwilaichat
75. Asst.Prof.Dr.Parinda Penroj
76. Assoc.Prof.Manop Panapoy
77. Asst.Prof.Dr.Thummanoon Prodpran
78. Asst.Prof.Dr.Piyarat Sirivongpaisal
79. Dr.Pitaya Adulyatham
80. Asst.Prof.Dr.Mutita Meenune
81. Assoc.Prof.Dr.Suppasil Maneerat
82. Assoc.Prof.Dr.Thawien Wittaya
83. Assoc.Prof.Dr.Waranyou Sridach
84. Asst.Prof.Dr.Supachai Pisuchpen
85. Asst.Prof.Dr.Santad Wichienchot
86. Asst.Prof.Dr.Pitchaon Maisuthisakul
87. Asst.Prof.Dr.Ekasit Onsaard
88. Asst.Prof.Dr.Komkhae Pilasombut

89. Assoc.Prof.Dr.Walailak Atthirawong
90. Assoc.Prof.Dr.Wanna Tungjaroenchai
91. Assoc.Prof.Dr.Adisorn Swetwiwathana
92. Dr.Kuakoon Piyachomkwan
93. Mr.Somchai Songsakdecha

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม : ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1.	รศ.ดร.สิทธิชัย ตันธนะสฤษดิ์	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
2.	ผศ.ดร.สมนิมิตร พุกงาม	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
3.	ผศ.ชัชชัย ตันตสิรินทร์	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
4.	ดร.ปิยพงษ์ ทองดีนอก	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
5.	ดร.สุภัทรา ถึกสถิตย์	ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์
6.	รศ.ดร.ดอกรัก มารอด	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
7.	รศ.ดร.รองลาภ สุขมาสรวง	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
8.	ผศ.ดร.วิจักขณ์ ฉิมโฉม	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
9.	ผศ.ดร.ประทีป ด้วงแค	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
10.	ผศ.ดร.นันทชัย พงศ์พัฒนานุรักษ์	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
11.	ผศ.ดร.สราวุธ สังข์แก้ว	ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์
12.	ผศ.ดร.วันชัย อรุณประภารัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์
13.	ผศ.ดร.สคาร ทีจันทึก	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
14.	ดร.จงรัก วัชรินทร์รัตน์	ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์
15.	ผศ.ดร.วีระภาส คุณรัตนสิริ	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
16.	ผศ.ดร.กาญจน์เขจร ชูชีพ	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
17.	ผศ.ดร.พสุธา สุนทรห้าว	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
18.	ผศ.ดร.รัชนี โพธิแท่น	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
19.	ดร.นิตยา เมี้ยนมิตร	ภาควิชาการจัดการป่าไม้ คณะวนศาสตร์
20.	รศ.ดร.เอ็จ สโรบล	ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร
21.	ผศ.ดร.สุดเขตต์ นาคะเสถียร	ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร
22.	ดร.สราวุธ รุ่งเมฆารัตน์	ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร
23.	รศ.ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
24.	รศ.ดร.พัฒนา อนุรักษ์พงศธร	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
25.	รศ.ดร.ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
26.	ผศ.ดร.จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์	ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์

27. ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
28. ผศ.ดร.ประไพพิศ ชัยรัตนมโนกร ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
29. ดร.ปิยาภรณ์ สมสมัคร ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
30. รศ.คณิตา ตังคณานุรักษ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
31. ผศ.ดร.สุรัตน์ บัวเลิศ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
32. ผศ.ดร.ทัศนีย์ บุญประคอง ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
33. ผศ.ดร.สุจิณณา กรรณสูต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
34. ดร.นฤชิต ดำปิน ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
35. ดร.กิตติชัย ดวงมาลย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม
36. รศ.ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
37. ผศ.อัจฉรา ดวงเดือน ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
38. ผศ.ดร.ฐิติยา แซ่ปัง คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
39. รศ.ดร.วราห์ เทพาหุดี ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง
40. ดร.อิสริยา วุฒิสินธุ์ ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง
41. รศ.ดร.ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
42. รศ.ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
43. ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
44. ผศ.ดร.พลกฤต กฤชไมตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
45. ผศ.ดร.ภาสกร ปนานนท์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม : ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. ศ.ดร.นิพนธ์ ตั้งธรรม นักวิชาการอิสระ
2. ศ.ดร.อุทัยรัตน์ ณ นคร นักวิชาการอิสระ
3. รศ.ดร.วิทยา ปั้นสุวรรณ นักวิชาการอิสระ
4. ผศ.ดร.บุญวงศ์ ไทยอุตส่าห์ นักวิชาการอิสระ
5. ดร.กันต์ ปานประยูร คณะสิ่งแวดล้อมทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ศาลายา)

Editorial Board

Subject : Natural Resources and Environment (internal)

1. Assoc.Prof.Dr.Sittichai Tantanasrit
2. Asst.Prof.Dr. Somnimirt Pukngam
3. Asst.Prof.Chatchai Tantasirin
4. Dr.Piyapong Tongdeenok
5. Dr.Supattra Thueksathit
6. Assoc.Prof.Dr.Dokrak Marod
7. Assoc.Prof.Dr.Ronglape Sukmasuang
8. Asst.Prof.Dr.Vijak Chimchome
9. Asst.Prof.Dr.Prateep Duengkae
10. Asst.Prof.Dr.Nantachai Pongpattananurak
11. Asst.Prof.Dr.Sarawood Sangkaew
12. Asst.Prof.Dr.Wanchai Arunpraparat
13. Asst.Prof.Dr.Sakhan Teechanteuk
14. Dr.Chongrak Wachrinrat
15. Asst.Prof.Dr. Weeraphat Khunrattanasiri
16. Asst.Prof.Dr.Kankhajane Chuchip
17. Asst.Prof.Dr.Pasutha Sunthornhao
18. Asst.Prof.Dr.Rachnee Pothitan
19. Dr.Nittaya Mainmit
20. Assoc.Prof.Dr. Ad Sarobol
21. Asst.Prof.Dr.Sutkhet Nakasathien
22. Dr.Sarawut Rungmekarat
23. Assoc.Prof.Dr.Tunlawit Satapanajaru
24. Assoc.Prof.Dr.Patana Anurakpongsatron
25. Assoc.Prof.Dr.Patthra Pengthamkeerati
26. Asst.Prof.Dr.Jukkrit Mahunjcharityawon
27. Asst.Prof.Dr.Chalor Jarusutthirak
28. Asst.Prof.Dr.Prapaipid Chairattanamanokorn
29. Dr.Piyapawn Somsamak
30. Assoc.Prof.Kanita Tungkananuruk
31. Asst.Prof.Dr.Surat Bualert
32. Asst.Prof.Dr.Tassanee Boonprakong
33. Asst.Prof.Dr.Sujinna Karnasuta
34. Dr.Narouchit Dampin
35. Dr.Kittichai Duangmal
36. Assoc.Prof.Dr.Sanya Sirivithayapakorn
37. Asst.Prof.Utchara Duangdeun
38. Asst.Prof.Dr.Thitiya Pung
39. Assoc.Prof.Dr.Wara Taparhudee
40. Dr.Idsariya Wudthsin
41. Assoc.Prof.Dr.Thongchai Rohitatisha Srinophakun
42. Assoc.Prof.Dr.Penjit Srinophakun
43. Asst.Prof.Dr.Taweedej SiriThanapipat
44. Asst.Prof.Dr.Pollakrit Kritmaitree
45. Asst.Prof.Dr.Passakorn Pananont

Subject : Natural Resources and Environment (external)

1. Prof.Dr.Nipon Thangtham
2. Prof.Dr.Uthairat Na-Nakorn
3. Assoc.Prof.Dr.Vittaya Punsuvon
4. Asst.Prof.Dr.Bunvong Thaiutsa
5. Dr.Gunn Panprayun

คณะกรรมการฝ่ายจัดพิมพ์เอกสาร

ดร.นีรนุช ภาชนะทิพย์
ที่ปรึกษา

นายจรูญศักดิ์ สวนสวรรค์
ประธานกรรมการ

นายปัญญา ซื่อตรง
รองประธานกรรมการ

นางสาวลิลา วุฒิวาณิชยกุล
กรรมการ

นางวัชรี ทองทิพย์
กรรมการ

นางสาวปฐมาวดี กุลวัฒนะไพศาล
กรรมการ

นางสาวยลรวิวรรณ วิบูรณวงศ์
กรรมการ

นางสาวศลิษา หวานวาจา
กรรมการ

นายพลวัฒน์ ตันหัน
กรรมการ

นางสาวสุดธิดา มีสวัสดิ์
กรรมการ

นางสาวจิราวรรณ สุริยกุล ณ อยุธยา
กรรมการ

นางปนัดดา ดีหะริง
กรรมการ

นางสาวอุดมลักษณ์ พลอยสุวรรณ
กรรมการ

นายภานุวัฒน์ บุญชัยกมลอากร
กรรมการ

นายวิทยา วงษ์เอี่ยม
กรรมการ

นางสาวธิดา จันทาพูน
กรรมการ

นายวัชระ นิลประพันธ์
กรรมการ

นางสาวกฤษฎี ปริวัตรกุล
กรรมการและเลขานุการ

นางสุฌานี ศรีดี
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางนฤมล อินถา
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวธัญญ์นัฐดา กุนอก
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ



ฝ่ายบริการการศึกษา สำนักทะเบียนและประมวลผล
อาคารระพีสาคริก ชั้น 7 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Tel. Fax 0 2118 0145 ต่อ 8214, 8215 E-mail : annualconference@ku.ac.th
http://www.annualconference.ku.ac.th